

Ma maison est en carton...

Julie Ribot

Ma maison est en carton ...

Ma maison est en carton ...

Julie Ribot

Mémoire de master sous la direction de Bettina Horsch

Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements à tous ceux qui m’ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de mémoire Bettina Horsch, professeur à l’ENSANantes. Je la remercie de m’avoir encadrée, orientée et conseillée tout au long des recherches, expérimentations et de l’écriture de mon mémoire.

Merci à Pascal Joanne, professeur à l’ENSANantes ,qui par ses conseils a guidé mes réflexions.

J’adresse mes remerciements à Phillippe Poullain, professeur à l’IUT de Saint Nazaire, qui m’a généreusement ouvert le laboratoire de l’IUT et accompagnée dans la réalisation et la compréhension des tests pratiques.

Je souhaite remercier Madame Lenoble ainsi qu’Alain Marboeuf pour le temps qu’ils m’ont accordé et les informations sur la construction avec du carton qu’ils m’ont apporté.

Je remercie mes parents, Patrick Ribot et Isabelle Vrillon, ainsi que ma famille et amis, Jonathan Roulé, Anaïs Ribot et Jennifer Paciello pour leur aide, les encouragements et le soutien dont ils ont toujours fait preuve.

Je remercie l’ENSANantes et particulièrement l’atelier pour m’avoir permis de réaliser mes expérimentations. Et les élèves qui passant par la halle m’ont donné conseils et critiques lors de mes réalisations.

Sommaire

Introduction

« Il était un petit homme, Pirouette cacahuète […]
Qui avait une drôle de maison […]
Sa maison est en carton, Pirouette cacahuète […]
Les escaliers sont en papier […]
Si vous voulez y monter, Pirouette cacahuète […]
Vous vous casserez le bout du nez »

Gabrielle Grandière, 1951

Cette comptine, apprise à l'école pour beaucoup d'entre nous, a bercé notre enfance. Elle évoque la mésaventure d'un homme qui se casse le nez en montant dans une maison en carton par des escaliers en papier. Cette comptine m'est remontée à la mémoire lors de la lecture d'articles à propos du travail de Shigeru Ban. Un paradoxe intéressant lorsque l'on sait qu'il est le lauréat 2014 du Pritzker Prize. Le carton, le papier, matériaux omniprésents autour de nous peuvent-ils être des matériaux d'architecture ? Est-il possible de les récupérer et de les utiliser ? Alors que nous atteignons les limites de notre système de consommation actuel, il est de la responsabilité de tous de chercher des solutions, et particulièrement des architectes de réfléchir aux matériaux qu'ils emploient dans leurs bâtiments. Le carton et le papier sont-ils des solutions durables ? Sont-ils une ressource locale exploitable ?

En France, en 2014, nous avons consommé en moyenne 134 kg de papier et de carton par habitant. L'organisation du tri et du recyclage sur le territoire français permet à de plus en plus de citoyens de mettre de côté ces déchets.
Les papiers et cartons récupérés peuvent-ils être utilisés comme matériaux de constructions durables et locaux ?

Afin de répondre à ces questions j'ai travaillé de deux façons. Tout d'abord de manière théorique en menant des recherches, lisant des livres et articles et parfois mené des entretiens avec des personnes amenées à construire à partir du carton. Puis dans un second temps en menant des expérimentations à partir de papiers et cartons récupérés. Ces deux manières de procéder pour répondre à mes questions constituent les deux axes principaux du mémoire.
Dans la première partie théorique je me questionne à propos des papiers et cartons. Sont-ils des matériaux d'architecture ? Est-ce qu'ils sont adaptés à la construction durable et locale ainsi qu'au système d'économie circulaire. Enfin j'étudie différents exemples d'utilisation du carton dans l'architecture, de Shigeru Ban à la récupération de papiers et cartons, en passant par l'isolation par le carton. Dans un second temps j'ai expérimenté la fabrication de briques à partir de papiers et cartons et effectué des tests sur les briques en laboratoire.

Théorie

1- Les papiers et cartons sont-ils des matériaux d'architecture ?

1-1 Qu’est-ce qu’un matériau de construction, qu’est-ce que du papier et du carton ?

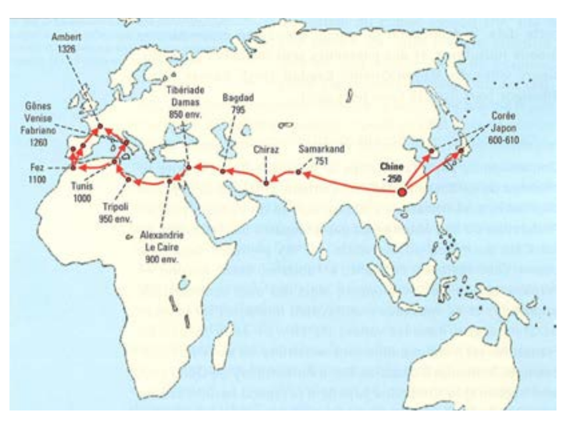
Lorsque l’on aborde la question des matériaux en architecture, on considère souvent sept grandes familles de matériaux : le métal, le béton, le bois, le verre, les dérivés de l’argile (terre crue ou cuite), le plastique ainsi que les matériaux herbacés (paille...). Le carton n’apparait pas dans cette liste, car peu de monde dans le domaine du bâtiment imagine sérieusement le carton comme un vrai matériau de construction. Mais qu’en est-il réellement ? Qu’est-ce qu’un matériau de construction ?

Selon Wikipédia, ce sont des matériaux utilisés dans les secteurs de la construction : bâtiments et travaux publics. S’en suit la liste des sept familles de matériaux et tous leurs dérivés. Le carton ou le papier ne sont pas mentionnés dans cette liste bien qu’ils soient utilisés dans le secteur du bâtiment.

Les papiers et cartons font partis de la même grande famille que le bois, la famille de la cellulose. Bien qu’ils aient déjà été utilisés dans le passé et que leur utilisation aujourd’hui ne fasse qu’augmenter, ils ne sont pas répertoriés comme de vrais matériaux de construction. Les papiers et cartons n’ont pas cette image de matériaux d’architecture car au contraire du béton, des métaux ou du bois ils paraissent fragiles et au contraire de la paille ou de la terre ils ne sont pas utilisés depuis des milliers d’années.



Le papier a été inventé au 2e siècle av J.C. et son utilisation s’est généralisée au 3e siècle après JC en Chine. L’essor du papier en Europe ne date que du 10e siècle après JC. Il faut ensuite attendre le 18e siècle et la construction de machines maîtrisant tout le processus de création pour voir le papier produit à grande échelle pour le grand public. On différencie le papier et le carton, cependant le carton est seulement un papier qui excède 175µm d’épaisseur ou qui fait entre 224 et 500 g/m².



La route du papier

Il existe aujourd'hui 6 grands types de cartons :

- Le carton moulé : (Boite à œufs) Cela ressemble à du papier mâché. Il faut mélanger des feuilles de papiers, de l'eau, de la farine et une armature en toile forte. Le mélange est ensuite pressé dans un moule.
- Le carton plein, carton pliant : (Tickets de tram ou cartes postales, carton gris de maquette) La pâte à papier est compressée et moulée en plaques ou en feuilles de 1 à 4 mm.
- Le carton spiralé : (Cœurs de bobines) Ce sont des tubes de carton qui forment une spirale et collés sur le recouvrement. Ces tubes de cartons ont été rendus célèbres en architecture par Shigeru Ban.
- Le carton nid d'abeilles : (intérieur de meubles IKEA ou des cloisons de Placoplatre) C'est un carton sandwich composé d'une âme en résille de carton et de deux surfaces de papiers kraft collées à la résille. Ce carton est très léger mais mauvais en isolation acoustique.
- Le carton ondulé : (emballages et transport) Il est majoritairement utilisé dans l'industrie. Un français en consomme 83 m² par an. Il est composé de deux feuilles de papier kraft collées sur une âme en papier kraft ondulé.
- Le carton contrecollé ou carton complexe : (Carton plume, carton aluminium des briques de jus de fruits …) C'est un carton collé avec un autre matériau comme des feuilles colorées, des feuilles de métal, des mousses, du polystyrène…

Ces différents cartons, tout comme le papier, ont déjà été utilisé en architecture dans le passé, nous allons voir comment.

1-2 Exemples historiques d'utilisation des papiers et cartons

Le premier exemple d'utilisation du papier date du 8e siècle au Japon. Les japonais utilisent le papier monté sur un squelette en bois pour servir de séparation entre leurs pièces, mais aussi comme porte. En Europe le carton a été employé en toiture. Il est utilisé car il est très léger et facile à mettre en place. Il est goudronné afin de ne pas être abimé par l'eau. En 1911, cette technique a été utilisée pour construire le toit de la gare centrale de Copenhague. Six arches supportent une structure en bois supportant à leur tour le carton goudronné.

En 1950, Buckminster Fuller, un chercheur et architecte américain, a utilisé des tubes de carton pour effectuer ses premières recherches sur les dômes géodésiques. En 1951 il imagine pour l'armée un abri en kit, fait de carton, facilement montable par les soldats. Il prédisait un bel avenir à l'utilisation architecturale de ce matériau, notamment dans la construction d'urgence et de lieux provisoires d'exposition mais aussi, au cours d'une évolution future, de l'habitat individuel.

Plus tard Shigeru Ban révolutionne la perception du carton en tant qu'élément structurel dans l'architecture. Il invente un système mixte bois carton spiralé très résistant. En 2000 Il construit une voute en treillis de tubes de carton de plusieurs milliers de m². Il utilisera ce système dans l'architecture d'urgence mais aussi dans plusieurs projets pérennes.

Aujourd'hui ce matériau est très souvent utilisé par les designers mais aussi parfois par des architectes. Le mobilier en carton est devenu assez populaire et les designers rivalisent d'ingéniosité pour mettre en valeur le matériau et mettre en avant ses capacités techniques. En effet le carton bien utilisé peut-être remarquablement solide.


Arches de la gare de Copenhague


Paroi en shōji


Cloison légère, Les marchands de sable

1-3 Quelles sont leurs caractéristiques physiques et thermiques ?

D'après Olivier Leblois , auteur du livre *Carton, mobilier, éco-design et architecture,* les principes constructifs du carton ressemblent à ceux du béton. La feuille recyclée travaille mal en traction, elle se déchire. Cependant elle résiste très bien à la compression.

Il possède une grande inertie physique et une grande résistance à la flexion. Il peut se plier facilement. On peut contrarier le pliage des feuilles par des pliages dans des directions contradictoires, cela vient contreventer la structure ou l'objet. L'auteur parle plus longuement des surfaces à double courbure, surfaces gauches qui sont indéformables et fabricables en carton.

Plus simplement, l'accumulation de plaques de carton collées entre elles permet de créer un ensemble très résistant.

Le carton est aussi mis en avant comme un matériau d'architecture d'intérieure. Il est facilement utilisable pour créer des séparations ou des structures légères.

Toutefois, les propriétés thermiques de certains cartons le rendent aussi intéressant que ses propriétés physiques. À une époque où les enjeux environnementaux poussent les architectes à chercher des solutions toujours plus performantes pour leurs bâtiments, le carton ondulé fait preuve de propriétés thermiques intéressantes. Sa structure cannelée en fait un matériau isotherme, un isolant. Au toucher il vous renvoie votre propre chaleur et parait presque chaud.



tea for one d'Olivier Leblois



Wiggle Side Chair Franck Ghery



Clorinda par Roberto Giacomucci

1-4 Quelles sont les limites actuelles de leur utilisation ?

1-4-1 Les préjugés

L’utilisation des papiers et cartons dans un autre domaine que l’emballage, le papier graphique et l’hygiène augmente beaucoup. Notamment dans le design et la fabrication de meubles. Ressource abondante et gratuite (en récupération) il fait l’objet d’une vraie valorisation. Sur internet de nombreuses vidéos expliquent comment créer des meubles soi-même simplement. Des créateurs se sont saisis de ce matériau et on le retrouve régulièrement dans les salons de mobilier ou d’artisanat. L’utilisation du carton par des designers et architectes célèbres tels que Franck Ghery a revalorisé le matériau.

Malgré ses intéressantes propriétés, surtout à propos de son utilisation en architecture, ce matériau souffre de nombreux préjugés, A ceux du bois, comme les problèmes de résistance au feu, à l’humidité ou aux nuisibles, il souffre en plus de préjugés concernant sa solidité et ses capacités techniques.

Olivier Leblois, auteur du livre *Carton, mobilier, éco-design et architecture* dit même : « Loin de moi l’idée de prétendre concurrencer la pérennité du granit avec du carton ondulé sensible à l’humidité ambiante et à l’écrasement … » L’auteur présente pourtant dans son livre plusieurs projets d’architecture utilisant le carton comme élément de structure. Les faiblesses du matériau ne sont pas seulement vues comme des limites mais plutôt comme des tares qui peuvent empêcher l’utilisation du carton comme un matériau de construction comme un autre.

Par ailleurs, si le bois et la paille souffrent dans l’Occident de l’histoire des trois petits cochons, cette histoire semble aussi s’étendre au carton. Bien qu’il ne soit pas mentionné dedans, les journalistes semblent assez facilement assimiler le carton à la paille dans cette histoire. Mais le carton a lui aussi son histoire décrédibilisante. En France, si l’on cherche maison en carton sur un moteur de recherche, on trouvera très facilement une comptine « ma maison est en carton » apprise aux jeunes enfants. Comptine qui conte que vous vous casserez le nez si vous osez monter dans une maison en carton. Loin d’être anecdotique, plusieurs articles à propos de maisons aux isolations carton et mêmes certains parlant de Shigeru Ban, commencent par l’invariable « Cette maison est en carton mais rassurez-vous, ce n’est pas comme dans la chanson, ce matériau est en fait très solide… » La construction en carton est très rarement abordée sans faire référence à cette chanson et ainsi sans mettre en avant les défauts potentiels du matériau.

1-4-2 La réglementation

Le dernier obstacle au développement du carton comme matériau de construction est, en France, sans aucun doute la réglementation. Celle-ci est très axée sur les matériaux traditionnels, il est difficile pour les matériaux peu usuels d’obtenir des autorisations. En France construire en paille ou en terre crue peut se révéler compliqué alors que ce sont des matériaux utilisés depuis plusieurs millénaires. Obtenir des avis techniques, des autorisations de construire ou même faire assurer le bâtiment se révèle très ardu car

il n'y a pas beaucoup de précédents.

Shigeru Ban a effectué de nombreux tests techniques sur ses tubes de carton . Au Japon, deux ans après avoir construit la bibliothèque d'un poète (bibliothèque pour un particulier avec une structure de carton), une loi sur la conformité des bâtiments homologua le tube de carton comme matériau de construction à part entière. Il est aussi l'auteur du pavillon du Japon à l'exposition universelle d'Hanovre en Allemagne. Là-bas le tube de carton était classé B2 et donc en accord avec la réglementation incendie. La toiture devait elle aussi être en papier cependant, après des rumeurs et une crainte d'attentats, ils ont été forcés de la couvrir par du PVC classé B1 afin d'éviter tout risque d'incendie.

Malgré des essais et les résultats du bureau d'études, l'ingénieur de Cologne a voulu que le pavillon soit soumis aux mêmes exigences qu'un bâtiment permanent. Ils ont été obligés de renforcer la structure bois par du métal. Finalement une charpente en bois vient tous les trois mètres renforcer la structure carton. Shigeru Ban s'est dit surpris que la municipalité n'ait pas eu confiance en Frei Otto et qu'elle soit réticente aux nouveaux matériaux et structures. Toutefois c'était une grande avancée pour le carton en tant que matériau d'architecture, lui et son équipe s'estiment satisfaits du résultat obtenu pour l'exposition universelle. Ban défie le rapport entre résistance et durabilité d'un matériau et résistance et durabilité d'une structure. Pour lui, ces facteurs dépendent de la technique de construction et de la connaissance des caractéristiques des matériaux choisis. Le papier et le carton sont à son avis, du bois évolué.

La présence du carton comme élément de structure d'un pavillon de l'exposition universelle donne au matériau une grande visibilité sur le plan international. Cependant, il sera tout de même difficile à intégrer dans les filières locales comme un matériau d'architecture semblable aux autres. En France plusieurs exemples de maisons isolées avec du carton existent, mais on est encore loin du bâtiment tout en carton ou papier.





Pavillon du Japon par Shigeru Ban
Exposition universelle d'Hanovre

1-5 Conclusion :

Les exemples d'utilisations du papier et du carton précédemment cités montrent bien que depuis plusieurs siècles ils sont utilisés comme matériaux de construction en architecture. Même si ces exemples d'utilisations restent singuliers et ne sont pas très répandus, leur utilisation est possible. Toute fois nous avons remarqué que des limites existent aujourd'hui à leur emploi dans la construction. Les préjugés et la réglementation sont des freins au développement de ce matériau dans le milieu architectural.

Aujourd'hui nous sommes à la recherche de nouveaux matériaux à l'empreinte environnementale moins forte. Dans le cadre du développement durable nous essayons de trouver des matériaux consommant moins d'énergie à la production et au transport, recyclables, fabriqués localement et de manière responsable.

C'est peut-être dans cette démarche que le papier et le carton peuvent prendre leur place. Le modèle de l'économie circulaire se développe et nous allons voir dans un premier temps comment la filière papiers et cartons s'adapte à ce nouveau modèle économique. Puis nous nous questionnerons sur la prise en compte des problématiques environnementales par cette filière. Enfin, nous verront comment le papier et le carton sont des ressources locales à fort potentiel de réutilisation.

Références

1-1 Qu'est-ce qu'un matériau de construction, qu'est-ce que du papier et du carton ?

- Reis D., Vian B. & Bajon, C. (2006). Le monde des fibres. Paris: Belin.

1-2 Exemples historiques d'utilisation des papiers et cartons

- Créations Carton. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.creations-carton.com/
- Emmerich, D. G. (1983). Maisons en carton. Paris: Plan Construction.

1-3 Quelles sont leurs caractéristiques physiques et thermiques ?

- Leblois, O. (2008). Carton: mobilier, éco-design, architecture. Marseille: ed. Parenthèses.
- Meadows, F. (2010). Carton plein !: 13 architectes à l'exercice de la cabane exposition, Paris, Cité de l'architecture et du patrimoine. Paris: Ed. Alternatives.
- Schmidt, P., & Stattmann, N. (2009). Unfolded: paper in design, art, architecture and industry (Birkhäuser). Bâle: Birkhaüser.

1-4 Quelles sont les limites actuelles de leur utilisation ?

- Leblois, O. (2008). Carton: mobilier, éco-design, architecture. Marseille: ed. Parenthèses.
- McQuaid, M., & Otto, F. (2007). Shigeru Ban (Réimpr). Paris: Phaidon.
- Shigeru Ban Architects. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.shigerubanarchitects.com/

2- La filière papier et carton est-elle adaptée au modèle d’économie circulaire durable et locale ?

Les modèles économiques circulaires, durables et locaux sont très souvent, surtout de nos jours, évoqués ensemble. Si bien qu’il est parfois difficile de comprendre ce qui les distingue et donc de comprendre en quoi ils se complètent. Nous allons commencer par comprendre ce que sont ces modèles avant d’analyser la structure de la filière papiers et cartons.

2-1- Définitions

2-1-1- Modèle de l'économie circulaire

Notre principal modèle économique depuis la révolution industrielle est essentiellement basé sur un modèle linéaire : L'extraction des matières premières, puis la production, la consommation et enfin les déchets.

Si ce modèle a permis à beaucoup d'accéder à un certain confort matériel. Aujourd'hui avec une population grandissante mondiale de 7,3 milliards d'individus, ce système arrive à sa limite. Notre consommation des ressources planétaires dépasse déjà la biocapacité de la terre. C'est-à-dire sa capacité à régénérer les ressources renouvelables, à fournir des ressources non renouvelables et à absorber les déchets. Aujourd'hui, devant l'urgence de la situation, une prise de conscience collective et des accords mondiaux tendent à réduire les impacts environnementaux de notre économie. Ce n'est cependant pas suffisant c'est pourquoi de nouveaux modèles économiques voient le jour.

L'économie circulaire désigne le concept économique qui s'inscrit dans le cadre du développement durable et qui s'inspire notamment des notions d'économie verte, d'économie de l'usage ou de l'économie de la fonctionnalité, de l'économie de la performance et de l'écologie industrielle. Selon la fondation Ellen Macarthur (fondation qui s'est donnée pour mission d'accélérer la transition vers l'économie circulaire) : « Une économie circulaire est par nature restaurative et régénérative et tend à préserver la valeur et la qualité intrinsèque des produits, des composants et des matériaux à chaque étape de leur utilisation. Le concept distingue les cycles biologiques et techniques.

Telle qu'envisagée à l'origine, l'économie circulaire est un cycle de développement positif continu qui préserve et développe le capital naturel, optimise le rendement des ressources et minimise les risques systémiques par la gestion des stocks et des flux de ressources. Un système qui demeure efficace quelle que soit l'échelle. »

Dans ce modèle la consommation n'intervient qu'au niveau des cycles biologiques, au niveau des cycles techniques, la ressource est revalorisée, récupérée et réintégrée au cycle.

Nutriments
Biologiques

SCHÉMA DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Nutriments
Techniques

AGRICULTURE, ARBORICULTURE, ÉLEVAGE, AQUACULTURE, CHASSE & PÊCHE

EXTRACTION MINIÈRE
FABRICATION DE MATÉRIAUX

MATIÈRES PREMIÈRES

FABRICATION (COMPOSANTS/ÉLÉMENTS)

ASSEMBLAGE (PRODUITS)

DISTRIBUTION (VENTE PRODUITS/SERVICES)

RESTITUTION

BIOSPHÈRE

BIOGAZ

MÉTHANISATION & COMPOSTAGE

COMPOSÉS ORGANIQUES MATIÈRES 1ÈRES AGRICOLES

CASCADES
(similaire aux cycles des nutriments techniques*)

EXTRACTION DE COMPOSÉS BIOCHIMIQUES
(post-récolte ou post-consommation)

CONSOMMATION

UTILISATION

MAINTENANCE PRÉVENTIVE / CURATIVE

REDISTRIBUTION RÉEMPLOI/ MUTUALISATION

RECONDITIONNEMENT/ RÉUSINAGE

RECYCLAGE

COLLECTE/TRI

COLLECTE/TRI

RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

ENFOUISSEMENT

A minimiser et optimiser

(*) ces cascades se retrouvent à toutes les étapes de la vie du produit

Graphique adapté de la Fondation Ellen MacArthur par l'Institut de l'économie circulaire et la chaire "business as unusual" de Kedge Business School

KEDGE BUSINESS SCHOOL

Institut de l'économie circulaire

L'économie circulaire est basée sur trois principes :

- Préserver et développer le capital naturel: Il est nécessaire de favoriser les ressources renouvelables ou au meilleur rendement et de dématérialiser les services dès que possible.

- Optimiser l'exploitation des ressources : Il est essentiel de concevoir des produits en pensant à leur fin de vie. De cette manière, l'obsolescence programmée n'est plus la base de la création de valeur. Penser la réutilisation, la réparation et le recyclage afin de garder la matière première dans la boucle et allonger le cycle de vie du produit. Penser la fin de vie du produit permet de transformer la gestion des déchets en simple étape de la boucle de matière. Il faudrait privilégier les cycles courts qui économisent l'énergie dépensée. En fin de cycle, la matière trop dégradée est valorisée énergétiquement ou utilisée en méthanisation ou compostage. Ainsi, la matière et l'énergie ne sont ni perdues, ni gaspillées.

- Créer les conditions propices au développement d'un système vertueux : Il est indispensable de réduire les risques environnementaux (pollution des terres, de l'air, de l'eau, éviter le rejet de substances toxiques et le changement climatique) ainsi que réduire les préjudices liés aux besoins humains (alimentation, santé, mobilité, habitat et éducation).

L'économie circulaire est source de nouvelles logiques économiques, de bien-être social et de production de valeur. Elle encourage le développement de l'économie de fonctionnalité, qui repose sur le passage de la vente d'un bien à la vente de son usage. La valeur réside dans la fonction (Par exemple l'utilisation des bicloo à Nantes). Elle encourage la mutualisation et la réutilisation des produits de consommation. De fait, la durabilité du produit est essentielle. De plus, en période de crise économique et d'essor des réseaux virtuels, les modèles d'économie collaborative, créatrice de lien social, se développent auprès des citoyens.

Selon le cabinet McKinsey, l'économie circulaire permettrait de réaliser une économie nette minimale de 380 milliards de dollars par an en matières premières en Europe. De plus, ce modèle permet la création de valeur positive fondée sur la consommation relocalisée et l'appui aux activités industrielles et agricoles locales.

L'économie circulaire permet de passer d'un modèle de réduction des impacts et des déchets à un modèle de création de valeur, économiquement, socialement et environnementalement

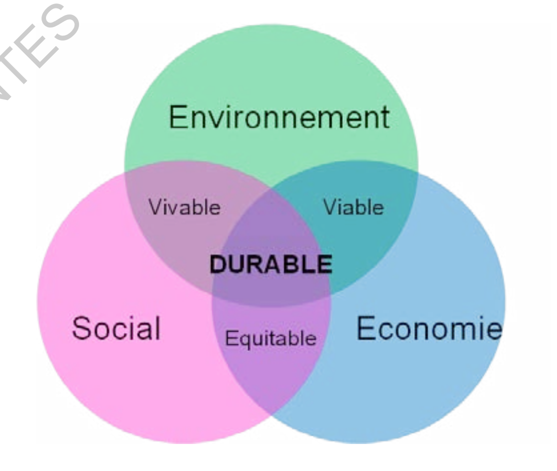
2-1-2- Prise en compte des problématiques environnementales

L'économie circulaire est un concept économique qui s'inscrit dans le cadre du développement durable. Développement qui permet de répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre au leur. Il prend en compte l'économie, les questions de société ainsi que les préoccupations environnementales.

Aujourd'hui la présence de l'être humain sur la terre est telle que son impact sur l'environnement, sur l'écosystème terrestre, est présent à tous les niveaux. Les géologues débattent actuellement pour savoir si l'on a modifié la terre à tel point que l'on pourrait considérer une entrée dans une nouvelle ère géologique, celle de l'anthropocène . Un terme qui vient d'anthropos, « être humain » et kainos « nouveau ».

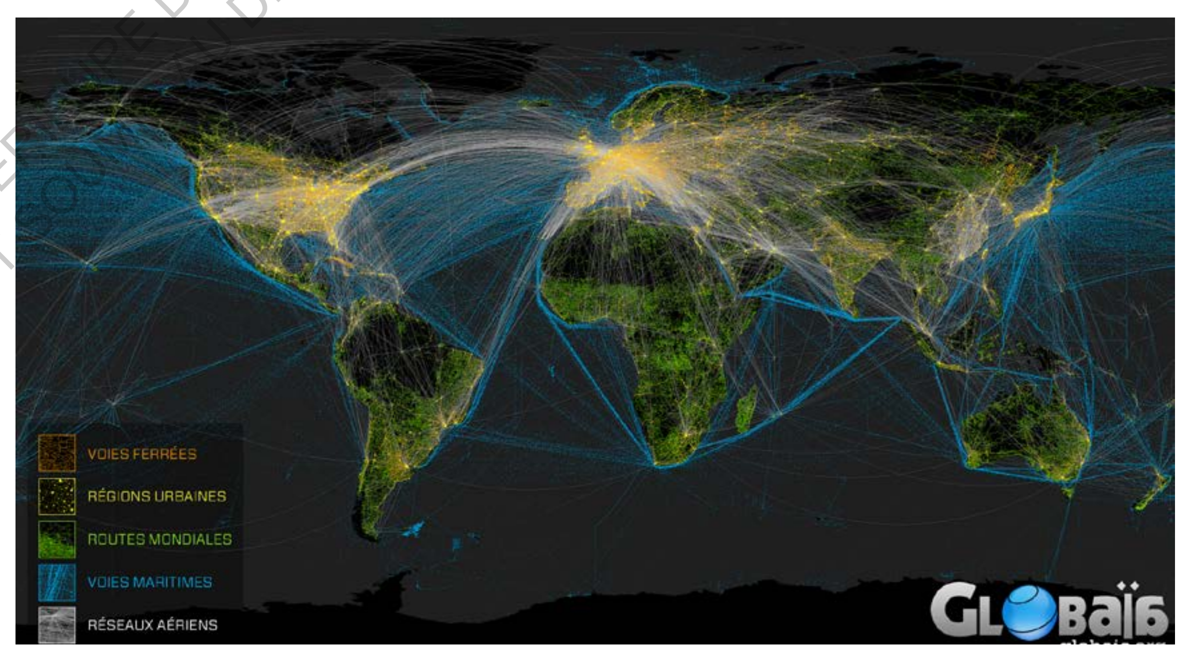
En effet l'activité humaine engendre un épuisement des ressources de la planète, la pollution de la terre, de l'eau et de l'air ainsi que la destruction des écosystèmes et de la biodiversité. Elle provoque le réchauffement climatique, dû entre autre, aux gaz à effet de serre. Elle génère une pénurie de l'eau douce et des énergies fossiles.

L'économie circulaire tend à diminuer les impacts environnementaux de l'économie humaine.



Les trois piliers du développement durable

Le système global de transport



2-1-3- Développement de l’économie locale

L’économie circulaire encourage la coopération entre les différents acteurs du territoire, qu’elle participe à redynamiser par un développement économique local. Ce modèle est idéal en terme de compétitivité. Il permet de développer de nouveaux marchés et donc de nouveaux emplois, le plus souvent locaux. Ces emplois ne sont pas délocalisables car ils sont liés à une pratique sur le territoire et variés. Ils peuvent nécessiter des qualifications élevées et des compétences particulières.

L’économie circulaire locale est basée sur l’expérimentation, l’intelligence collective et l’entreprenariat. Elle permet d’inventer et de construire ensemble de manière adaptée au territoire, à ses ressources, ainsi qu’aux besoins de ses habitants. L’économie locale permet la mise en réseau d’entrepreneurs qui peuvent agir ensemble. Elle encourage la création de commerces et de lieux d’échange. Elle est créatrice de lien social.

D’autre part, le développement de ces circuits courts permet la réduction du transport des produits et donc atténue l’impact sur le changement climatique.



2-2- La filière s’adapte à l’économie circulaire durable et locale

2-2-1- Une filière en restructuration

En 2014[1] , la France est le 13e producteur de papier et de carton au monde et le 5e en Europe. Le secteur seul du papier à usage graphique en France produit 2.6% du PIB. Du fait de son importance, cette filière a fait l’objet de plusieurs études, commandés par le gouvernement, par des entreprises privées et même en interne, au sein de l’organisme de la filière. En effet, la filière papier et carton affronte aujourd’hui de nombreux défis. Elle doit faire face à la compétitivité mondiale, la fragmentation de la filière, le durcissement des normes environnementales ainsi qu’à la baisse d’attractivité du secteur.

Afin de préserver son activité, la filière est en train de se restructurer entièrement et de se tourner vers l’économie circulaire.

1- copacel rapport statistique 2013 vdec14.pdf. (s. d.). Page 29

2-2-1-1- La filière s'organise afin de faire face au marché mondial

La filière papier carton en France représente un grand nombre d'entreprises et de salariés, 70 000 salariés et 1200 établissements[2]. Le domaine du carton ondulé regroupe 9500 salariés et 59 usines.

En France, comme dans de nombreuses autres filières, celle des papiers et cartons est fragmentée en plusieurs centaines de petites entreprises, réparties sur tout le territoire. Leur nombre est important car la filière regroupe plusieurs métiers différents. (Bois, production, transformation, distribution, tri, imprimeries…)

En 2009, 56% des entreprises de la filière employaient moins de 20 salariés contre à peine 7 % plus de 250 salariés. Les plus grosses entreprises regroupent plus de la moitié des effectifs et réalisent 66% du chiffre d'affaire[3].

Trois entreprises sur 4 en France font partie d'un plus grand groupe, ceux-ci dominent l'industrie papetière. Les groupes d'origine étrangère rassemblent les deux tiers des effectifs de la filière, ainsi que les trois quarts du chiffre d'affaire.

L'industrie des papiers et cartons se subdivise en trois grands domaines, les papiers à usage graphiques, les papiers et cartons d'emballage, ainsi que le papier d'hygiène. Chaque ensemble a ses organismes représentants, ainsi que chaque sous-groupe. Par exemple, le carton ondulé est représenté par Carton Ondulé de France, la fédération chargée de promouvoir et développer la filière de production du carton ondulé, regroupant 90% des entreprises de l'ondulé.

Elle-même fait partie de COPACEL, l'Union Française des Industries des Cartons, Papiers et Cellulose. Il s'agit d'un syndicat professionnel qui rassemble les producteurs de pâte de papier et de carton français et qui a pour objet de promouvoir leurs intérêts dans tous les domaines de leur activité, d'harmoniser l'action de ses membres et d'assurer leur représentation auprès des pouvoirs publics et des parties prenantes de la société civile. COPACEL est également chargée de la collecte et de l'analyse d'informations statistiques et économiques, de la promotion de l'image de l'Industrie et de ses produits ainsi que de la diffusion d'informations sur les thèmes professionnels.

Enfin tous ces organismes promouvant les trois secteurs de la filière, tels que COPACEL pour les cartons, font partie du MIP, Mouvement de l'Intersecteur Papier carton ; confédération regroupant 11 organismes, représentants la production, la transformation et la distribution de la filière papiers et cartons. Le MIP était il y a seulement deux ans la Maison des Industrie des papiers et carton il a de puis changé de titre.

2- Dossier-de-presse_1 conférence MIP.pdf. (s. d.). Page 2

3- L'industrie papetière_Alpha.pdf. (s. d.). Page 20/21

2-2-1-2- Le modèle de l'économie circulaire adapté à la filière papiers et cartons

Les petites entreprises souffrent d'une différence d'échelle de production par rapport aux entreprises classique sur le marché international (producteur scandinaves et sud-américains). Mais elles portent aussi sur des grosses entreprises dont la rentabilité est vulnérable au prix de la pâte à papier sur le marché mondial.

Dans la filière de production, un gros travail de gain de productivité a été mis en place tout le long de la ligne de production. Cependant des améliorations sont encore possibles dans le secteur de la transformation, surtout sur les taches manuelles.

Correctement optimiser les circuits afin de ne rien perdre en énergie ou en matière est de plus en plus appliqué dans la filière des papiers et cartons. Les entreprises qui ne se conforment pas à ce système circulaire ont de grosses difficultés. La filière encourage fortement les entreprises des différentes étapes de production ou de recyclage des papiers et cartons à se regrouper et fonctionner de concert afin d'éviter toute perte d'énergie ou de matière.

« Standardiser la consigne de tri sur l'ensemble du territoire, interdire la mise en décharge des vieux papiers, obliger à l'installation d'un dispositif de tri à la source dans les logements neufs, sécuriser les paiements entre les industriels et les récupérateurs, intégrer des clauses environnementales aux appels d'offres publics, ou bien encore réfléchir à l'évolution des labels certifiant l'éco-responsabilité des produits. Cela fait parti des « 34 chantiers » décrits par Serge Bardy, député PS, dans son rapport : *France, terre d'avenir pour l'industrie papetière.*

La part des papiers et cartons recyclés après usage est de 81,6% en 2013. Selon Paul Lacour, délégué général de Copacel, pour l'augmenter il faut agir dans des secteurs où le papier est encore peu récupéré, comme les papiers des bureaux. Cela passe aussi par le développement d'une filière organisée de recyclage. Qui permette la réduction des coûts de transport et l'optimisation du mélange entre papier recyclé et nouvelles fibres. Le taux de recyclage du papier usagé est déjà élevé mais peut encore augmenter afin d'atteindre les meilleures performances européennes.

«Le papier comme le bois se prêtent bien en France à une économie circulaire, puisque nous disposons en abondance de ces ressources, mais que nous n'en tirons pas suffisamment de valeur ajoutée au profit de nos territoires»[4], explique Serge Bardy, D'un point de vue géographique, les industries papetières sont implantées sur l'ensemble du territoire national, mais deux régions dominent, Rhône-Alpes et le Nord-Pas de Calais, qui regroupent respectivement 13,1% et 8,9% des effectifs. Les entreprises sont fréquemment localisées dans des zones peu développées industriellement, offrant un milieu naturel favorable à leur activité, avec la présence d'eau et des facilités d'approvisionnement en matières premières, bois et fibres ou de collecte de papiers récupérés.

4- France, terre d'avenir de l'industrie papetière Rapport de Serge Bardy .pdf. (s. d.). page 227

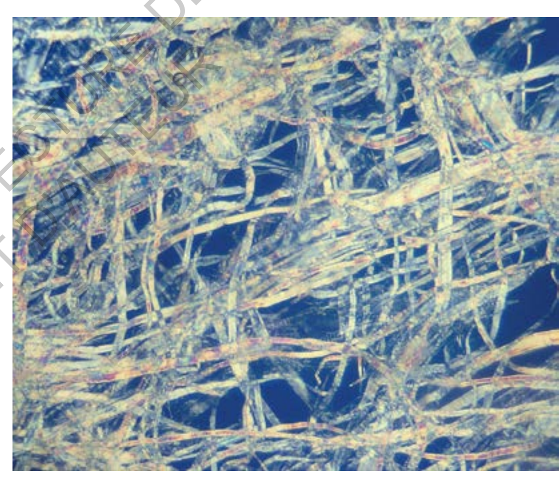
2-2-1-3- Pôle de compétitivité de la cellulose

Le MIP vise aussi à développer une filière afin de renforcer la collaboration entre les acteurs ayant pour point commun la fibre de cellulose, et d'élargir la réflexion sur les possibilités offertes par la fibre de papier. La fermeture d'une grosse usine dans le Nord-Pas-de-Calais témoigne d'un déficit de compétitivité du secteur en France. Il souhaite favoriser la création d'un pôle de recherche portant sur la cellulose en général. Ses usages sont variés, des cosmétiques à la fusée Ariane et des biocarburants aux isolant en ouate de cellulose jusqu'au papier intelligent. La création d'un pôle de recherche et développement permettrai au secteur des papiers et cartons en France de se diversifier et de mieux exploiter les compétences des chercheurs et entreprises en matière de cellulose.

À Épinal en France se trouve le Campus fibre, thématique unique en France, il rassemble sur un même site des acteurs de la formation, de la recherche et de la valorisation autour du vaste domaine de la fibre. Au cœur de ce campus il y a l'ENSTIB (École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois). Il s'agit d'une école d'ingénieurs dédiée au bois et à ses applications. Cette école accueille en son sein des laboratoires de recherche ainsi que des structures d'appuis industriels.

Le CRITTIB (Centre Régional d'Innovation Technologiques des Industries du Bois) partage son équipement avec l'ENSTIB afin de répondre aux besoins des entreprises en matière de recherche et développement. LE CTP (centre technologique du papier) basé à Grenoble a ouvert une antenne sur le Campus Fibres d'Épinal. Cet organisme de recherche et de développement industriel, d'expertise et d'information apporte un soutien scientifique et technique à propos des pâtes, papiers, cartons et industries associées. Il assure un lien entre les entreprises du secteur papetier et le centre de recherche.

Le pôle de compétitivité recherché par le MIT portant sur la cellulose en général a peut-être sa première ébauche à Epinal. Le fait que le cœur du Campus soit l'ENSTIB laisse à penser que des passerelles pourraient être tissées entre la filière du papier et du carton et celle de l'architecture.
Conclusion



Cellulose

La filière papier et carton est en pleine restructuration afin de réorganiser son fonctionnement autour des grands principes de l'économie circulaire : Nous avons compris comment l'association des entreprises et le remaniement de l'organisation va permettre à la filière de faire face au marché mondial. Ensuite nous avons remarqué que la production et le recyclage du papier et du carton permettent une optimisation de l'exploitation de la ressource. Enfin nous avons vu comment la filière compte se développer et de quelle manière cela est intéressant pour le milieu architectural.

Nous allons maintenant comprendre comment la filière papier et carton crée les conditions propices au développement d'un système vertueux.

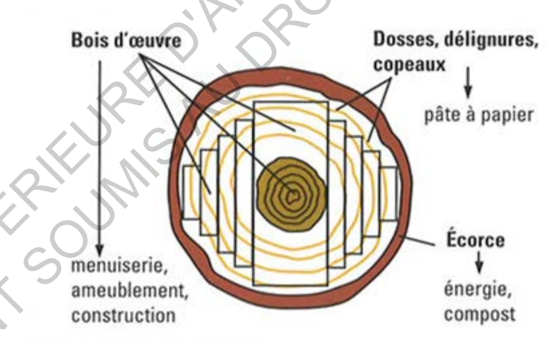
2-2-2- Des préoccupations environnementales qui font changer la filière

L'industrie du papier est souvent jugée responsable de la déforestation, de la pollution des rivières qui les entourent, de polluer l'air et de consommer beaucoup d'énergie. Ces accusations pèsent depuis les années 80, mais depuis, la filière n'a cessé de se transformer. Un vrai travail sur la gestion de l'eau et de l'énergie a été fait et des normes encadrent maintenant les déchets produits. Le passage à l'économie circulaire a été très bénéfique. Nous allons nous attacher à percevoir ce qu'il en est, aujourd'hui, des conséquences environnementales de la production du papier(dédié au carton ondulé).

2-2-2-1- L'utilisation du bois comme matière première participe-t-elle à la déforestation ?

En 2013[5], 6992.9 milliers de tonnes de bois ont servi à la création de pâte vierge . Or le bois provient des forêts. La forêt mondiale est d'environ 4 milliards d'hectares et la forêt française est actuellement de 16,5 millions d'hectares soit environ un quart du territoire français. Mais si la forêt est, à certains endroits de la planète, exploitée de manière excessive, en France, elle augmente de 0,6% par an[6]. Elle est en constante augmentation depuis la moitié du dix-neuvième siècle. Malgré l'augmentation de la taille des villes, des domaines agricoles sont abandonnés et la forêt augmente dans les montagnes ou sur le pourtour méditerranéen[7]. Celle-ci est gérée de manière durable et aucun arbre n'est abattu pour la fabrication du papier.

En effet, le bois servant à fabriquer la pâte à papier est issu de l'entretient de la forêt. On utilise des sous produits de l'exploitation du bois comme les houppiers (cimes des arbres), les arbres tordus dans lesquels on ne peut tailler de planches et les coupes d'éclaircies effectuées pour le développement de la forêt et éviter les incendies. L'on utilise aussi les sous produits des industries de sciage tels que les dosses, délignures et copeaux.



les produits de l'exploitation du bois

La forêt française est gérée durablement, mais qu'en est-il des forêts étrangères ? Nous ne produisons pas assez de pâte à papier en France par rapport à notre consommation. Tous les ans nous importons 2021,8 milliers de tonne de pâtes à papier venues de l'étranger[8]. 1084 tonnes importées d'Europe, 770,1 d'Amérique latine, 130,2 d'Amérique du Nord et 37,3 venues d'Asie.

Or les forêts de Russie ou du Brésil, par exemple, ne sont pas toutes gérées durablement au contraire de notre forêt française. Certaines forêts sont réimplantées d'une même espèce d'arbres, sans prévoir la biodiversité nécessaire au bon développement de celles-ci, alors que d'autres ne sont simplement pas replantées du tout. Par aileurs, certaines entreprises qui respectent la forêt en Europe participent à la déforestation dans des régions du monde moins contrôlées.

5- Copacel rapport statistique 2013 vdec14.pdf. (s. d.). Page 18

6- ONF - Office national des forêts - Accueil. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.onf.fr/

7- ONF - Office national des forêts - Accueil. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.onf.fr/

8 Copacel rapport statistique 2013 vdec14.pdf. (s. d.). Page 20

2-2-2-2- La fabrication de la pâte est-elle un danger pour l'environnement ?

Le bois est composé de fibres de cellulose, collées entre elles par la lignine. Le papier est constitué de fibres non ordonnées et agglutinées entre elles, il faut donc séparer la lignine des fibres pour faire de la pâte. La pâte vierge est majoritairement produite selon deux méthodes, le procédé mécanique ou le procédé chimique. Dans le premier cas le bois est râpé et broyé de manière mécanique puis imprégné d'eau. Cette méthode a un très bon rendement, 90 à 95 %[9] de la matière est transformée en pâte. Dans le second cas le bois est broyé et mis à cuire pendant plusieurs heures avec un réacteur chimique qui dissout la lignine. Le rendement est moindre, 45 à 55% ce qui reste est un déchet.

Le papier qui sert à produire le carton ondulé est fabriqué à partir d'une pâte semi- chimique qui mélange les deux procédés. Le procédé mécanique disperse les fibres tandis que le procédé chimique les dissout. Le bois utilisé pour faire du carton ondulé vient d'arbres feuillus il faut utiliser le procédé alcalin ou « procédé kraft », le procédé acide étant utilisé pour les bois résineux. L'agent chimique est une solution de soude et de sulfure de sodium qui dégage des vapeurs toxiques au cours de la cuisson.

À terme la pâte est lavée plusieurs fois pour éliminer la lignine qui s'est détachée, c'est « la liqueur noire ». Celle-ci va être traitée afin de séparer la lignine des déchets toxiques qui forment la « liqueur blanche ». Ceux-ci sont récupérés et réintroduits dans le cycle pour une autre cuisson ou bien brulés. La lignine, l'hémicellulose et les résines sont rejetées sous forme de boue. Cette dernière, essentiellement organique, est donnée aux agriculteurs afin qu'ils la répandent dans les champs enrichissent les sols. Le rendement de la pâte semi- chimique est meilleur que celui de la pâte chimique, il est de 70 à 80 % et la qualité de la pâte est supérieure à celle d'une pâte mécanique.

L'industrie du papier est accusée de polluer l'eau et l'air ainsi que de consommer beaucoup d'énergie. Les industriels ont mis en place depuis plus de 30 ans de nombreux procédés afin de réduire drastiquement leur impact sur l'environnement.

Il faut 70 000 litres d'eau[10] pour produire une tonne de papier, 30 000 litres sont réinjectés dans le cycle de production. 40 000 litres sont rejetés, sous forme de vapeurs ou directement dans les rivières. L'eau rejetée est traitée dans une station d'épuration propre à l'usine, mais il reste tout de même des produits chimiques rejetés, et parfois surviennent des accidents.

Pour exemple, le 5 juillet 2012, à Biganos en Gironde, une cuve contenant 3500 m3 de liqueur noire éclaté. Elle s'est répandue sur le sol et sous l'effet de la vague de 100 à 500 m3 ont rejoint une rivière d'eau douce qui afflue dans le bassin d'Arcachon. 300kg de poisson mort a été retrouvé mort le lendemain. Les produits chimiques rejetés dans l'eau des rivières augmentent le PH de l'eau et consomme l'oxygène dont ont besoin la faune et la

9 Reis, D., Vian, B., & Bajon, C. (2006). Le monde des fibres. Paris: Belin. Page 168

10 Papier classique vs Papier recyclé. (2010, septembre 22). Consulté à l'adresse http://www.consoglobe.com/papier-classique-vs-papier-recycle-4438-cg

flore aquatique.

Entre janvier 1996 et décembre 2005, la base Aria a recensé 61 accidents provenant de l'industrie du papier et du carton, issus d'une défaillance matérielle ou humaine[11] . De plus, une étude,[12] sur le rejet des substances dangereuses dans l'eau issues de l'industrie du papier et du carton, montre que le traitement recommandé de ces eaux est inapplicable aujourd'hui en termes de coût d'installation et de fonctionnement.

En France des normes encadrent le rejet des polluants, mais ce n'est pas le cas partout dans le monde. Pour consommer du papier responsable il faut chercher sur les emballages les normes NF Environnement ou ISO 14 001 qui garantissent le respect des normes anti-pollution.

Fabriquer du papier demande beaucoup d'énergie, environ 5000 kW/h par tonne de papier produit. Le bois, avant toute opération de transformation, est écorcé. Ce sont ces écorces ainsi que les produits chimiques non réutilisables qui sont brûlés afin de produire toute l'énergie nécessaire à la fabrication du papier. Toutefois la combustion entraîne une pollution de l'air. Pour la diminuer, des électrofiltres retiennent les particules issues de la combustion de la liqueur noire. Des laveurs de gaz sont positionnés à la sortie des fours et les composés volatiles soufrés, à l'origine de la mauvaise odeur que l'on peut ressentir à proximité des usines, sont redirigés vers des installations de combustion.

La production de papier engendre 269,6 kg de Co2 rejetés dans l'air par tonne de papier produit. Cependant la majorité du Co2 provient de la combustion des écorces de bois, or le bois ne rejettera pas plus de carbone que ce qu'il emmagasiné en se développant.

La production de pâte vierge peut être à l'origine de pollutions et de changement climatique, selon la façon dont elle a été fabriquée. Il appartient aux consommateurs de vérifier la provenance du bois qui a été utilisé pour produire le papier et aux industriels de continuer à réduire les émissions de polluants, que ce soit de l'eau ou de l'air. De gros efforts des entreprises ont déjà été réalisés sachant que la totalité de l'énergie qui sert à produire le papier provient de la combustion des déchets de cette même production.

De la même manière nous allons nous attacher à étudier la fabrication de la pâte à papier provenant de papiers et cartons récupérés. 97% de la pâte utilisée pour fabriquer une feuille de papier destinée au carton ondulé est produite à partir de FCR, Fibres et Cartons Récupérés. Cette pâte n'est pas produite de la même manière et les pollutions engendrées sont donc différentes.


Usine baikalsk polluant le lac Baïkal(Russie), l'usine a fermé sous la pression de groupes écologistes

11 Pollution accidentelles des eaux surface continentales 2005.pdf. (s. d.). Page 4

12 Rejet de substance dangereuses dans l'eau CTP 03 juin 2014 COPACEL.pdf. (s. d.). Page 6

2-2-2-3- Les pâtes à base de papiers-cartons récupérés

Les papiers et cartons utilisés sont des rebuts d'industrie, tel que les rognures d'imprimerie ou les journaux invendus. D'autres proviennent du tri des déchets émanant des entreprises ou des particuliers. Les papiers et cartons sont triés par sortes puis compactés en balles.

Les papiers et cartons sont défibrés dans un pulpeur, les fibres sont mouillées et brassées pour se détacher les unes des autres. Les agrafes sont retirées par des aimants, des épurateurs centrifugent et éliminent matières plastiques et métaux. Dans les papiers et cartons utilisés se trouvent des additifs comme de la colle ou de l'encre. Il faut laver la pâte en utilisant des produits chimiques. La pâte dédiée au carton ondulé ne nécessite pas d'être blanchie, celle-ci nécessite donc beaucoup moins de produits chimiques qu'une pâte recyclée destinée au papier de bureau.

Pour fabriquer une tonne de papier recyclé il faut une 1,2 tonne de papier. Les déchets sont moindres par rapport à la fabrication de papier à partir du bois. Les usines sont équipées pour recycler 90 % des produits chimiques utilisés sans avoir à les brûler. Il faut autant d'eau pour fabriquer du papier recyclé que du papier neuf, 70 000 litres, cependant dans ce procédé on peut réutiliser 90 % de l'eau au lieu de 57% pour du papier vierge. Il faut aussi deux fois moins d'énergie pour fabriquer ce papier, 2500 kW/h[13] .

Comme il n'y a pas de déchet de bois ni de déchets toxiques à brûler pour produire de l'énergie, les usines fonctionnent à l'électricité ou au gaz. Une usine qui produit du papier recyclé rejette plus de Co2 qu'une usine qui produit du papier vierge. Il faut cependant prendre en compte d'autres paramètres: Le bois qui arrive à l'usine a été transporté par des camions depuis des forêts qui ne sont pas toutes à proximité et il faut trois tonnes de bois pour seulement une tonne de papier vierge. Or, la matière première du papier recyclé, les papiers et cartons récupérés, provient de circuits courts. Les usines de papier recyclé sont implantées partout en France. Le transport est moindre et il faut seulement 1,2 tonne de papier pour produire une tonne de papier recyclé.

Le papier recyclé engendre moins de pollution atmosphérique, moins de pollution de l'eau et utilise moins d'énergie. Mais il ne faut pas oublier que le papier ne peut pas être recyclé à l'infini, il faut encore introduire des fibres neuves dans le papier recyclé. Par ailleurs, après avoir obtenu la pâte à papier il faut produire la feuille et ensuite fabriquer le carton ondulé. Ces deux procédés sont aussi coûteux en eau et en énergie.



Balles de déchets de papiers d'Ecrit Couleur

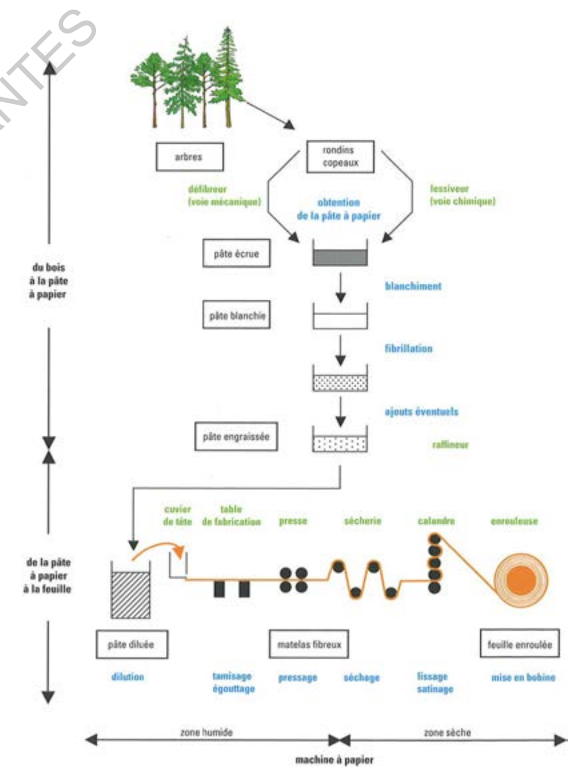
13 Papier classique vs Papier recyclé. (2010, septembre 22). Consulté à l'adresse http://www.consoglobe.com/papier-classique-vs-papier-recycle-4438-cg

2-2-2-4- La fabrication d'une feuille de papier et du carton ondulé

Si l'opération principale de la fabrication de la pâte à papier est de séparer les fibres, la production d'une feuille de papier vise à les rapprocher. Il faut enlever l'eau de la pâte et créer des liaisons entre les fibres en usant de beaucoup d'énergie. La machine qui va créer la feuille mesure environ 150m de long et entre 4et 10m de large, elle comporte une zone humide et une zone sèche.

La pâte liquide est projetée par jet sur une toile métallique sans fin. Dans la zone humide elle va passer de 99% d'humidité à un intervalle de 30 à 45 % d'humidité. La pâte est égouttée par gravité, soumise à des mouvements saccadés latéraux, puis pressée entre des cylindres recouverts de feutres absorbants. L'eau qui est récupérée est soit renvoyée dans les pulpeurs pour produire la pâte, soit concentrée pour récupérer les fibres qui se sont échappées. La feuille est suffisamment formée pour pouvoir passer dans la zone sèche. Là, elle passe à 10% d'humidité, le taux naturel d'une feuille de papier. La feuille passe entre des rouleaux de fonte chauffés par de la vapeur, elle est séchée des deux faces. Ensuite peuvent survenir différentes étapes de lissage de la feuille afin de la rendre brillante. Les feuilles sont stockées sous forme de bobines et celles-ci sont acheminées vers différents centres de transformation.

Le papier est plié par thermoformage dans une onduleuse. La feuille de papier est humidifiée puis passe sur des cylindres dentelés. Les crêtes des cannelures sont enduites de colle, à base d'amidon, de résine synthétique ou de silicate. Le papier qui sert de cannelure est chauffé et appliqué contre le papier lisse, la chaleur fait fondre la colle et adhère aux ondulations. La feuille simple et la feuille ondulée collées sont des couches qui peuvent être multipliées pour fabriquer le carton ondulé double ou triple faces. C'est l'étape de fabrication du carton qui est la moins polluante, seule de l'eau est utilisée pour ramollir le carton et de l'énergie pour chauffer l'eau et les cylindres.



De l'arbre à la feuille de papier


Zone sèche d'une machine à papier

2-2-2-5- Les chantiers en cours de la filière papiers et cartons

Outre la fabrication ou le recyclage du matériau en lui-même, la filière travaille sur des projets qui permettront encore d'améliorer l'empreinte environnementale du matériau.

En 2015 une éco-contribution a été fixée par le conseil d'éco-folio[14]. Elle se monte à 54 euros HT par tonne de papier émis. « Les donneurs d'ordre, qui émettent plus de 5 tonnes de papiers, ainsi que les fabricant ou importateurs, doivent acquitter, avant le 30 avril de chaque année, une contribution sur le tonnage de papier produit et distribué au cours de l'année précédente. » La somme est ensuite reversée aux collectivités locales en charge de l'élimination et du recyclage des déchets. Des bonus et malus s'ajoutent à cette contribution de base. Celle-ci est calculée en fonction de la quantité de papier émise, puis modulée en fonction de l'origine de la fibre et de sa recyclabilité : Un bonus de 10 % pour les papiers contenant plus de 50 % de fibres recyclées. Un malus de 5 % pour les papiers ne répondant pas aux critères de la fibre de l'éco-label européen. Un malus de 5 % par élément perturbateur du recyclage (usage de colle, de vernis UV, d'encres non désencrables ou de plastiques...).

Dans un second temps la filière aimerait mettre en place une série de mesures visant à augmenter l'utilisation de papiers et cartons produits en accord avec les principes du développement durable. Par exemple : intégrer des clauses environnementales aux appels d'offre publics, ou bien encore réfléchir à l'évolution des labels certifiant l'éco-responsabilité des produits.

14 Contribution sur les papiers (ÉcoFolio) - professionnels | service-public.fr. (s. d.). Consulté à l'adresse https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F23280

2-2-2-6- Conclusion

Depuis 35 ans maintenant la filière évolue et les changements ont été très importants. De ces recherches nous pouvons conclure que la production de papier neuf engendre une consommation d'énergie et de produits chimiques que l'on souhaiterait encore réduire. Cependant le développement de l'utilisation du papier recyclé et du carton (majoritairement issu du recyclage) permet de minimiser ces consommations. De plus, les nouveaux projets de la filière permettront de veiller à augmenter la qualité des produits et leur bilan environnemental.
L'économie circulaire s'inscrit dans le cadre du développement durable et veille à développer de manière égale les questions économiques, environnementales et sociétales. Nous allons voir que le papier et le carton, de par leur omniprésence sur le territoire, sont source de développement local.

2-2-3- Une filière à implantation locale ?

Les entreprises de la filière du papier et du carton sont dispersées sur le territoire. La filière tend à se structurer et mettre en lien toutes les entreprises afin de créer une force permettant de faire face au poids des grosses industries européennes ou mondiales. Cependant, elle peut intelligemment profiter de la dispersion des différentes filiales sur le territoire. Elle peut s'appuyer sur des entreprises implantées dans les régions depuis longtemps, dans un territoire et sur un marché qu'elles connaissent bien. Ces entreprises sont donc des points d'impulsions possible des initiatives de la filière.

On retrouve dans les régions, des imprimeries, des centres de recyclage et de tri et tous les services de récupération des déchets papiers et cartons. Le papier et le carton sont des matériaux présents partout dans notre vie, au bureau, dans les lieux publics ou privés.

À Nantes ils sont jetés dans des poubelles séparées dans les lieux publics et peuvent l'être dans les lieux privés. Jetés dans les sacs jaunes ils sont récupérés par les services de la ville et envoyés dans un centre de tri. Les papiers et cartons de bureaux sont des déchets plus compliqués à récupérer. En effet, aucune loi n'oblige les entreprises privées à recycler leurs déchets de papier et carton. Le tri du papier est organisé et globalement performant sur les sites départementaux de l'agglomération nantaise qui sont desservis par un service de collecte spécifique de l'association « Arbres »[15] .

Cette association récupère les papiers et cartons mais aussi d'autres déchets comme les bouteilles plastiques, les Cds ou le matériel électronique. Ils organisent des collectes régulières mais peuvent aussi proposer des bennes à ordure en cas de désarchivage massif par exemple. Les entreprises font de plus en plus appel à ce genre d'associations en France ou alors aux services de la ville lorsque celle-ci en dispose.

Les papiers et cartons sont des matériaux présents localement en abondance, leur fabrication, utilisation et recyclage crée de nombreux métiers dans les régions.

À Nantes les commerçants peuvent déposer leurs cartons devant les magasins deux fois par semaine. Un camion de la ville vient les récupérer. Cela pose problème car les cartons restent de nombreuses heures dans les rues en attendant que le ramassage en milieu de journée. De nombreux commerçants se plaignent car cela donne un effet de «poubelle à ciel ouvert»[16] dans les rues de Nantes.

15 arbres - recyclons solidaire. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.arbres44.org/

16 Article du ouest France http://www.ouest-france.fr/pays-de-la-loire/nantes-44000/des-com-



Rue commerçante de Nantes

Les commerçants doivent ficeler les cartons afin qu'ils ne s'envolent pas mais beaucoup d'habitants du centre-ville rajoutent leurs propres déchets sans les attacher et cela s'envole avec le vent. C'est un gros problème actuel à Nantes, surtout depuis les travaux du centre-ville et la piétonisation de certaines rues.

La récupération des papiers et cartons s'effectue tant bien que mal à Nantes, Ces déchets ont pour moi un important potentiel de valorisation. Actuellement les papiers et cartons sont envoyés dans un centre de recyclage pour permettre la création de papiers ou nouveaux cartons. Cependant des étudiants, particuliers, associations, collectifs ou même agences profitent de ces deux journées de dépôt des cartons afin de venir récupérer ces déchets pour leur propre usage. Le carton jeté dans les rues est un déchet facile à récupérer et à transporter.

Il peut être difficile de trouver des plaques de carton en bon état, non déchirées ou abimées par l'eau ou d'autres déchets, pour les utiliser à des fins qui nécessitent un aspect esthétique soigné.

Toutefois s'il s'agit de récupérer des plaques pour les entasser afin de créer un isolant ou s'il s'agit simplement de les déchirer et de les utiliser pour faire une pâte de carton et créer des briques, les papiers et cartons de rue sont idéaux et simples à trouver. Les initiatives de récupération en centre-ville sont modestes et servent généralement des intérêts privés ou des projets singuliers. Cependant, la récupération systématique de ce matériau afin de le détourner, le réutiliser ou le transformer en un autre produit serait possible.

Les papiers et cartons sont des matériaux qui soutiennent, de par leur filière et leur présence dans notre environnement, l'économie et les initiatives locales. Cependant, pour l'instant, les déchets de papiers et cartons ne sont pas encore suffisamment récupérés et exploités. De nouvelles filières pourraient en tirer parti et s'implanter dans les territoires.




stockage des fibres et cartons récupérés

mercants-nen-peuvent-plus-des-dechets-970080

2-2- Conclusion

2-3 Conclusion

La filière papier et carton est en pleine restructuration afin de réorganiser son fonctionnement autour des grands principes de l'économie circulaire. Elle continue ses efforts de transition énergétique et environnementale commencés il y a 30 ans et développe de nouvelles ambitions de recherche et de développement. De plus, la présence du carton et du papier sur le territoire est un vecteur de développement de l'économie locale.
Nous allons maintenant étudier certaines utilisations du papier et du carton qui s'inscrivent dans les démarches étudiées en amont.

Références

2-1- Définitions

2-1-1- Modèle de l'économie circulaire

- Économie circulaire - Ellen Macarthur Foundation. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse https://www.ellenmacarthurfoundation.org/fr/economie-circulaire/concept
- Qu'est-ce que l'économie circulaire ? (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.institut-economie-circulaire.fr/Qu-est-ce-que-l-economie-circulaire_a361.html
- Économie circulaire. (2016, avril 27). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89conomie_circulaire&oldid=125653659
- copacel rapport statistique 2013 vdec14.pdf. (s. d.).

2-1-2- Prise en compte des problématiques environnementales

- Anthropocène. (2016, avril 23). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Anthropoc%C3%A8ne&oldid=125545726
- Foucart, S. (2016, janvier 2). Allons-nous entrer dans l'anthropocène en 2016 ? Le Monde.fr. Consulté à l'adresse http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/01/02/allons-nous-entrer-dans-l-anthropocene_4840896_3244.html
- Cartographie de l'Anthropocène - Globaïa. (s. d.). Consulté à l'adresse http://globaia.org/fr/portfolio/cartographie-de-lanthropocene/

2-1-3- Développement de l'économie locale

- Créer un réseau d'entreprises pour une économie locale et durable | Mouvement Colibris. (s. d.). Consulté 4 à l'adresse https://www.colibris-lemouvement.org/agir/guide-tnt/creer-un-reseau-dentreprises-pour-une-economie-locale-et-durable
- Economie locale - Le Labo de l'économie sociale et solidaire. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.lelabo-ess.org/+-Economie-locale-+.html

2-2- La filière s'adapte à l'économie circulaire durable et locale

2-2-1- Une filière en restructuration

- Copacel rapport statistique 2013 vdec14.pdf. (s. d.).
- dossier-de-presse_1 conférence MIP.pdf. (s. d.).
- L'industrie papetière_Alpha.pdf. (s. d.).
- Copacel | Copacel. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.copacel.fr/fr
- Carton Ondulé de France - Carton Ondulé de France. Consulté à l'adresse http://www.cartononduledefrance.org/
- France, terre d'avenir de l'industrie papetière Rapport de Serge Bardy .pdf. (s. d.).
- Les laboratoires et les centres de transferts enstib. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.enstib.univ-lorraine.fr/fr/recherche/les-laboratoires-et-les-centres-de-transferts/

2-2-2- Des préoccupations environnementales qui font changer la filière

- Copacel rapport statistique 2013 vdec14.pdf. (s. d.).
- ONF - Office national des forêts - Accueil. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.onf.fr/
- Reis, D., Vian, B., & Bajon, C. (2006). Le monde des fibres. Paris: Belin.
- Papier classique vs Papier recyclé. (2010, septembre 22). Consulté à l'adresse http://www.consoglobe.com/papier-classique-vs-papier-recycle-4438-cg
- Pollution accidentelles des eaux surface continentales 2005.pdf. (s. d.).
- Rejet de substance dangereuses dans l'eau CTP 03 juin 2014 COPACEL.pdf. (s. d.)..
- Carton Ondulé de France - Carton Ondulé de France. Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.cartononduledefrance.org/
- Contribution sur les papiers (ÉcoFolio) - professionnels | service-public.fr. (s. d.). Consulté à l'adresse https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F23280

2-2-3- Une filière à implantation locale ?

- Arbres - recyclons solidaire. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.arbres44.org/
- Article du ouest France http://www.ouest-france.fr/pays-de-la-loire/nantes-44000/des-commercants-nen-peuvent-plus-des-dechets-970080

3- Analyse d’exemples d’utilisation des papiers et cartons

Produits neufs ou déchets, les papiers et cartons les papiers et cartons sont utilisés de plus en plus couramment en architecture et de manière variée. Nous verrons en premier lieu le carton comme un nouveau matériau innovant dans le travail de Shigeru Ban. Dans un second temps, nous aborderons l’emploi du carton dans des produits de construction courants. Enfin, nous examineront un exemple de réutilisation de déchets de papiers et cartons en architecture.

3-1- Utilisation du carton neuf de manière innovante dans un circuit court. Les tubes de carton par Shigeru Ban

L'architecte ayant rendu célèbre l'utilisation du carton dans l'architecture est Shigeru Ban, un architecte japonais, diplômé en 1984 de l'école d'architecture de Cooper Union, récompensé pour sa carrière en 2014, d'un Pritzker Price.

Shigeru Ban utilise les tubes de cartons spiralés dès son premier projet de scénographie en 1989 jusque dans ses derniers projets comme un pont éphémère, le pavillon de l'ambassade du Brésil pour la coupe du monde de football, ou encore à Hiroshima en intervention d'urgence en 2014. Les propriétés physiques du carton en font un matériau facilement utilisable lors de projets de courte durée mais il l'utilise aussi dans des projets pérennes comme la bibliothèque d'un poète ou le musée d'art Nemunoki pour enfants.

Les papiers et les tubes de cartons sont jetés en grands nombres dans les bureaux. Shigeru Ban remarque l'étonnante capacité de résistance à la compression des tubes de cartons spiralés. Après quelques tests il apprécie la résistance aux tremblements de terre du matériau. Le Japon est soumis régulièrement à de nombreux séismes, or, le béton est un matériau qui résiste mal aux tremblements, il se désintègre et de ce fait fragilise les structures des bâtiments et met en danger les occupants. Par ailleurs les tubes de cartons se produisent dans de nombreux de diamètres et de longueurs différentes, permettant à l'architecte d'envisager de nombreuses solutions. La légèreté du carton et ses propriétés physiques l'incitent donc à penser les tubes de carton comme une alternative au bois, matériau plus lourd et plus coûteux.

Shigeru Ban



3-1-1- Un matériau local et recyclable

Bien avant les mouvements écologiques que nous connaissons de nos jours, Shigeru Ban portait une attention particulière aux matériaux peu couteux, réutilisables, recyclables et produits localement.

Les tubes de carton sont entièrement fabriqués à partir de feuilles de carton, elles même issues du recyclage d'autres cartons, et destinées à être recyclées en fin de vie. De plus, il est aisé de trouver des tubes de carton spiralés car ils sont produits en usine partout dans le monde. « L'artisanat local ne se trouve nulle part ailleurs que là où il existe, c'est lui qui fait l'authenticité des bâtiments. »

Shigeru Ban

3-1-1-1- Architecture d’urgence

Shigeru Ban est aujourd’hui conseiller au Haut-Commissariat des Nations unies pour les réfugiés. Après avoir observé les camps du Rwanda, il a travaillé sur des possibilités d’améliorations pour les abris des réfugiés. Ceux-ci utilisaient des bâches et du bois local, causant, pour la construction de leurs abris, une déforestation. Lorsque le HCR (haut-commissariat aux réfugiés) est passé aux cadres d’aluminium, la valeur du métal était telle que les réfugiés vendaient les tubes et repartaient abattre des arbres. Shigeru Ban a alors recommandé de créer des structures à base de tubes de papier produits localement.

Il a imaginé des abris reposant sur des fondations en caisses de plastique de bières ou de coca cola, remplies de sable, données gratuitement par les usines locales. Au dessus une structure en tubes de carton permet d’édifier les murs, ceux-ci protégés en toiture par une bâche. Ce système a été utilisé dans plusieurs pays après différentes catastrophes, à Kobe en 1995, en Turquie en 2000 ainsi qu’en Inde en 2001. Le système a été adapté en fonction des régions aux cultures, ressources et climats différents. A Kobe l’étanchéité est réalisée par ruban de mousse entre les tubes. En Turquie, à cause du climat, les tubes en carton ont été remplis de vieux papiers et ceux du plafond de fibre de verre. Un enduit étanche est réalisé entre les tubes. En Inde le sol est laissé en terre battue et la toiture est en bambou, une ressource localement abondante. Shigeru Ban sait adapter son système de murs en tubes de carton afin de produire des abris rapidement, à très bas coûts et d’une grande qualité architecturale.

Les tubes de cartons sont porteurs de projets sociaux. Shigeru Ban travaille bénévolement pour tous ses projets d’architecture d’urgence et encourage ses étudiants à garder à l’esprit la paix dans le monde : « En tant qu’architecte, je ne fais pas de distinction entre les projets liés aux situations d’urgence et le travail réalisé pour les grandes multinationales ».



Japon



Turquie



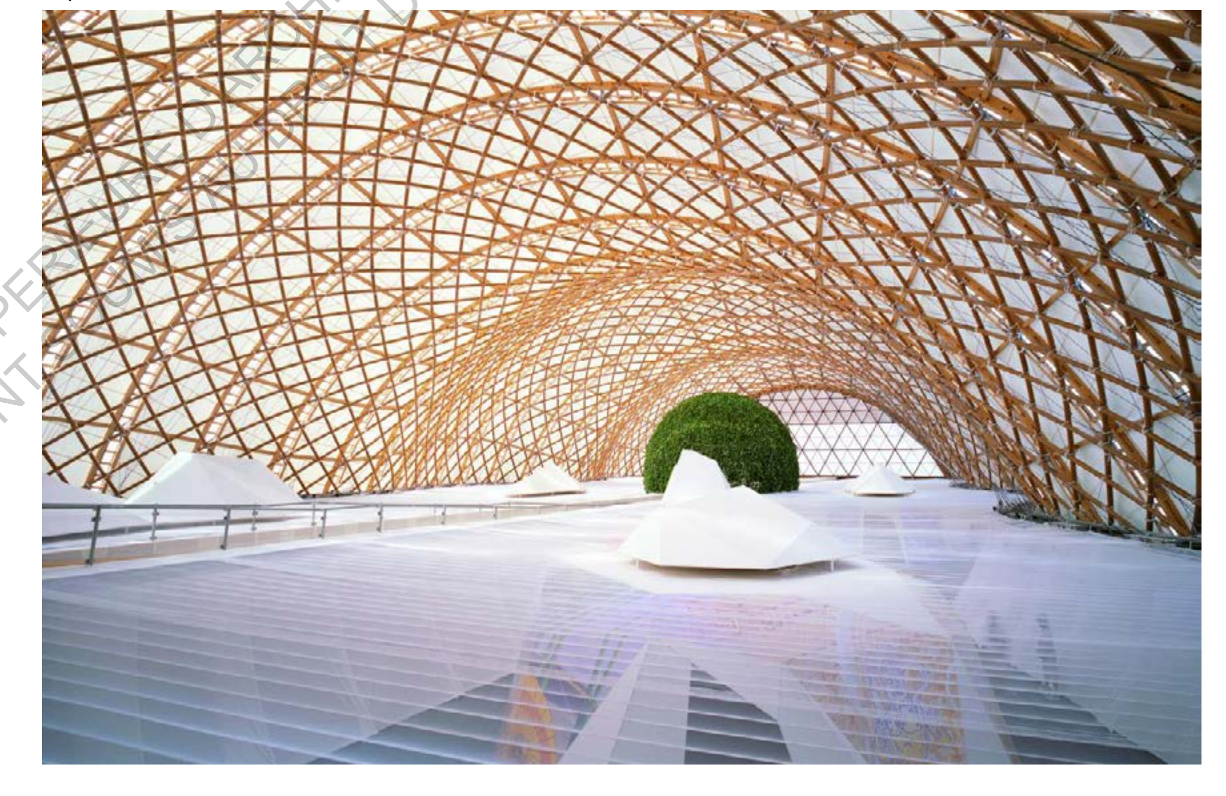
Inde

3-1-1-2- Pavillon de Hanovre

Shigeru Ban a travaillé avec Otto Frei et Buro Happold pour le pavillon du Japon à Hanovre. Le thème cette année était l'homme, la nature et la technologie. L'équipe a souhaité construire un pavillon qui produirait aussi peu de déchets industriels que possible quand il serait démantelé. L'objectif était soit de recycler soit de réutiliser presque tous les matériaux qui sont entrés dans le bâtiment. Ils ont opté pour une structure en tubes de carton, en treillis tridimensionnel pour éviter les déformations. La couverture devait être en papier uniquement. Une entreprise était capable de réaliser un papier résistant à l'eau et se recyclant, cependant il a dû être recouvert d'une membrane de PVC afin de mieux résister à de possibles incendies. Dans un désir de simplicité, l'assemblage coulissant des tubes entre eux se fait à l'aide d'un ruban de tissus, lui aussi recyclable.

Le carton est un matériau recyclable et léger, il est donc facile de l'utiliser dans des constructions éphémères devant être déconstruites sans laisser de déchets. Par ailleurs Shigeru Ban a développé l'utilisation du carton dans des projets d'architecture pérenne.

Pavillon du Japon par Shigeru Ban
Exposition universelle d'Hanovre



3-1-2- Un matériau innovant

Le carton dans les projets de Shigeru Ban est un produit innovant. Les tubes de cartons utilisés ne sont pas des tubes de carton récupérés. Ce sont des tubes neufs dimensionnés et produits pour un bâtiment en particulier. Ils peuvent avoir différents diamètres, longueurs et épaisseurs. La composition du papier le constituant peut varier ainsi que le revêtement du tube. Ce sont des matériaux de grande qualité. Shigeru Ban travaille avec des ingénieurs afin de dimensionner les tubes et d'effectuer toutes sortes de tests techniques. Ceux-ci sont effectués avant le montage du bâtiment et en cas de projet éphémère des tests sont effectués après le démontage. L'architecte est donc en mesure de travailler le carton comme un autre matériau, en ayant connaissance de toutes ses propriétés physiques.

Les assemblages entre les tubes de carton ont beaucoup évolués. Dans l'architecture d'urgence ils sont passés des connecteurs en plastique à des connecteurs en contreplaqué. Dans les projets de structure en carton, les premiers assemblages dans la Bibliothèque du poète ou dans le dôme de carton à Gifu étaient des blocs de bois. Cependant ils étaient trop couteux, aujourd'hui se sont souvent des ferrures métalliques qui assurent la connexion, comme dans le projet de pont a Remoulin en France. Les poteaux de l'église de carton à Kobe au Japon sont fixés grâce à un nœud en bois à une couronne en contreplaqué, support des tendeurs qui servent pour la toiture. En France dans la halle du toueur, le centre d'interprétation du canal de Bourgogne, les nœuds sont en aluminium moulé.

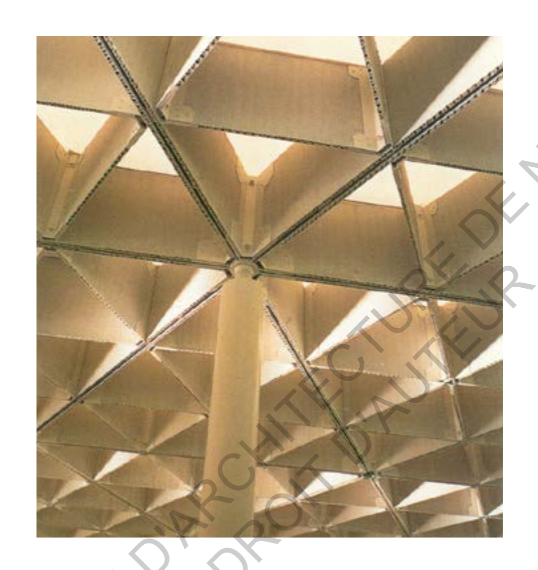


Détail d'assemblage en bois, Bibliothèque d'un poète

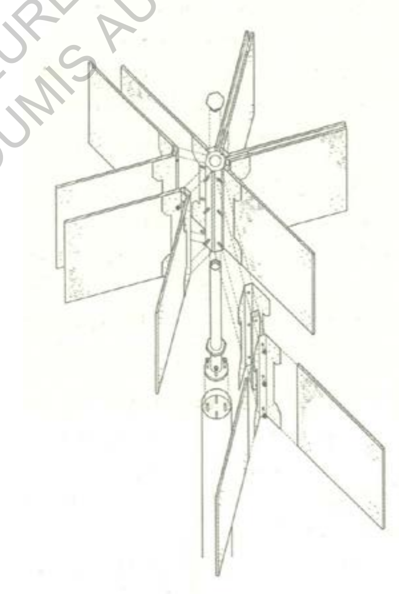


Détail d'assemblage en métal, pont de papier

Par ailleurs, l'architecte n'a pas utilisé que des tubes de carton dans ses projets. Il a aussi travaillé le carton alvéolaire dans le musée d'art Nemunoki pour enfants. La toiture treillis est une grille triangulaire composée de panneaux de carton alvéolés. Ces panneaux sont positionnés deux par deux et fixés à des nœuds métalliques couronnant les 15 colonnes d'acier supportant la toiture. Le carton alvéolaire est plus couramment utilisé que les tubes de carton, il est utilisé dans les cloisons, et dans la fabrication de nombreux meubles (IKEA l'utilise régulièrement). Cependant ici le carton a été pensé comme un tout.
D'habitude il est constitué de deux feuilles de papier épais collé autour d'un carton cannelé. Ici les alvéoles et le carton sont moulés en même temps pour former une entité. Shigeru Ban évoque la simplicité et la banalité du carton. Il met en valeur son aspect humble et améliore ses caractéristiques fondamentales.



Détails musée d'art Nemunoki



3-1-3- Un matériau d’architecture valorisé

Shigeru Ban a popularisé l’utilisation du tube de carton dans le monde entier. Il a démontré dans de nombreux projets que le carton est bien un matériau comme les autres. Il l’utilise aussi bien à l’intérieur qu’à l’extérieur, dans des projets éphémères ou pérennes, de la simple scénographie jusqu’à la structure de milliers de mètres carrés.

Le carton utilisé par Shigeru Ban est toujours valorisé dans une structure qui reste visible, il ne le cache pas. Les assemblages et détails de ses bâtiments sont très souvent mis en valeur et observables à l’œil nu. Le carton n’est pas traité différemment du bois, les tubes deviennent des poutres et poteaux. Leur jonction se travaille autour de nœuds en bois ou en métal. Les assemblages sont pensés comme on pense les détails d’un bâtiment en poteau poutre bois de nos jours. Entre les mains de Shigeru Ban le tube de carton devient une matière noble.

L’apparence des tubes de carton et leur position dans l’espace joue un rôle important dans la perception du carton. Les tubes sont lisses et de couleur unie. Le revêtement en polyéthylène des tubes lui donne une apparence brillante et non terne comme le carton que l’on côtoie habituellement. Par ailleurs, la couleur marron des tubes rappelle la couleur naturelle du bois, de loin l’ensemble n’est pas choquant, c’est une couleur familière.

Les tubes sont installés dans une architecture qui est toujours simple voire minimaliste. On est très loin des déchets de cartons qui traînent dans les rues. Disposés au sol comme des poteaux, les tubes forment des murs qui ondulent et créent des espaces rassurants. Les tubes par leur forme ronde sont propices aux ambiances douces de cocon. Ils n’accrochent pas l’œil, l’espace reste fluide.

Le carton est utilisé comme un matériau noble et est donc considéré de cette façon.

Le carton chez Shigeru Ban est médiatique et médiatisé. De nombreux ouvrages sur la carrière de l’architecte avec ce matériau ont déjà paru. Toutefois, l’architecte n’utilise que du carton neuf. Nous allons voir dans les exemples suivants d’autres types de cartons utilisés de manières différentes. Quelles sont leurs techniques de mise en œuvre et comment le carton est-il perçu ?



Maison à Yamanashi, Japan



Cathédrale de carton à Christchurch, New Zealand

3-2- Utilisation du carton comme un matériau classique

Au contraire de Shigeru Ban qui met en valeur le carton de manière médiatique, les deux exemples d'utilisations suivants sont comparables dans leur désir de discrétion lors de la mise sur le marché de leur produit. Ils ne jouent pas sur l'utilisation du carton pour marquer les esprits, ils souhaitent s'insérer sur le marché sans attirer l'attention afin de ne pas provoquer l'inquiétude du client potentiel. Leur désir n'est pas de faire des projets remarquables, mais simplement de développer l'utilisation du carton comme matériau commun d'architecture.

3-2-1- Comme isolant: Présentation de l’IPAC

Plusieurs industriels ou particuliers ont inventé des systèmes d’isolation par le carton. Ils espèrent développer leur produit et devenir concurrentiels sur le marché de l’isolation. A l’heure où les nouvelles réglementations techniques obligent les architectes à plus de performances et où les préoccupations mondiales à propos du développement durable encouragent professionnels et particuliers à chercher de nouveaux matériaux moins polluants, le potentiel du carton semble très intéressant.

L’IPAC (Isolant Porteur Alvéolaire Cellulosé) est un produit développé par la société BAT’IPAC dont Alain Marboeuf est le président. En 2008 Hubert Lê (inventeur du produit et aujourd’hui responsable produit) fait construire sa maison mais au premier hiver des fuites d’eau font jour et l’isolation thermique est défaillante. Il souhaite donc isoler entre les chevrons de la toiture. N’ayant que peu de moyens, et ayant à disposition du carton dans son entreprise, il va redécouvrir le potentiel isolant du carton. Un système simple d’ossature bois isolée avec du carton est imaginé et testé au CRIT bois d’Épinal. Les résultats sont bons et un brevet est déposé en 2009. En 2013, après un an de conception, trois semaines de préfabrication en atelier et deux semaines de chantier, la première maison « alvéolaire » sort de terre à Belle île en Mer en Bretagne. D’autres maisons et bâtiments publics verront le jour les années suivantes. En sept ans le produit a beaucoup évolué, nous nous attacherons à décrire la dernière évolution connue du produit.

L’IPAC est simplement l’accumulation de plaques de carton ondulé triple cannelure (13.6mm) pour former un bloc. Celui-ci est protégé de l’eau par une enveloppe plastique issue du recyclage du PVC et elle-même recyclable. Le bloc forme un isolant rigide à insérer entre les montants de l’ossature bois.


Photo de l’IPAC au salon de l’habitât - Guérande

3-2-1-1- Des performances mécaniques et thermiques intéressantes

L'apport du carton à la construction en ossature bois est ici très intéressant. La première évolution par rapport à un système ossature bois classique est que le carton n'est pas seulement isolant. Il apporte une résistance mécanique à la structure. Le système est plus solide et selon l'entreprise résiste mieux aux séismes. On pourrait utiliser ce système dans des régions où la réglementation sismique est plus exigeante.

De plus, les panneaux de contreventement (OSB ou autre) fixé aux montants ne sont pas nécessaires. Le carton a une certaine souplesse et est très solide, il renforce l'ossature bois. Lors des tests à Epinal ils ont fait un test d'arrachement. L'effort de rupture est à 34 200 N.

Le système de l'IPAC a été testé plusieurs fois. Dans le gymnase de Kaysersberg le test d'étanchéité à l'air obtient un résultat de 0,57. Un très bon résultat, l'ERP de 400 m² devait rester en dessous de 1.7. Le système est aussi thermiquement performant.

Un test a été effectué au CRITT(Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie) d'Épinal, pour un mur en ossature bois isolé avec 290 mm d'IPAC, la résistance thermique était de 7.88 m².K/W, le déphasage était de 15h. « Plus que le lambda ce qui est important c'est le déphasage. En Août par 35 degrés à Kaysersberg, sans climatisation, il faisait 20 degrés dans le gymnase. » Alain Marboeuf. Le déphase d'une paroi en ossature bois varie selon l'isolant utilisé mais est globalement bien plus faible qu'une paroi de brique ou de béton.
D'après un document de l'ESB (Ecole Supérieure du Bois) un mur en ossature bois de220mm isolé avec différents isolants à un déphasage de :

2h15 avec de la laine de verre
5h30 avec ouate de cellulose
10h20 avec fibre de bois

Un mur béton a un déphasage de 8h35 avec polystyrène en isolation extérieure
L'IPAC, permet d'apporter plus d'inertie au mur que de la ouate de cellulose. Il dépasse même le temps de déphasage de la fibre de bois. Quinze heures de déphase est un temps un peu long mais tout de même intéressant.


Maison de Belle-Ile en Mer - Morbihan

3-2-1-2- Un produit qui s'inscrit dans une filière locale, durable et circulaire ?

Les dimensions de l'IPAC restent standard afin que les entreprises n'aient pas à adapter leurs machines afin de travailler leur matériau. La société BAT'IPAC espère que ces entreprises fabricantes pourront changer de machines au long terme pour faciliter leur production. En attendant toute entreprise de charpente peut travailler cet isolant.

Le produit de la société BAT'IPAC utilise du carton provenant de l'entreprise DS Smith Packaging, le leader européen du carton ondulé et le premier fournisseur de carton en France. C'est une entreprise qui assimile beaucoup de petites entreprises de production et de recyclage de carton. Ils sont implantés partout en France et à l'international. BAT'IPAC souhaite s'appuyer sur leur infrastructure afin de produire localement le carton qu'ils utilisent et le recycler en fin de vie. Ils peuvent donc envisager un développement mondial.

Actuellement leurs produits sont fabriqués par un ESAT (Etablissement et Service d'Aide par le Travail) en Alsace. C'est dans cet ESAT, où travaillent 80 personnes en situation de handicap, que les plaques de cartons sont collées, découpées … afin de créer les blocs d'IPAC terminés. La création des blocs de carton de l'IPAC est extrêmement simple. Le produit demande peu de compétences pour être produit et est très facilement mis en place dans la construction. L'entreprise espère pouvoir s'agrandir et lier d'autres partenariats avec différents ESAT. Elle souhaite développer un produit dit « local » pour cela il faudrait pouvoir produire l'IPAC à proximité des chantiers.

C'était le cas pour le gymnase de Kaysersberg, le papier avait été récupéré dans les différentes communes, transformé en carton en Alsace et assemblé dans l'ESAT local. Cependant ce n'est pas le cas des autres chantiers en France qui doivent faire venir les blocs d'IPAC d'Alsace alors que la ressource en carton se trouve près de chez eux.



modules d'IPAC destinés à la maison de Belle-Ile en Mer dans le Morbihan



Bâtiment ERP multi-activités, Kaysersberg

3-2-1-3- Un produit « banal » ?

Même si des modules sur mesure peuvent être créés, les dimensions principales de l'IPAC sont de 550 mm de large pour 120 mm de haut. « Il faut que ça corresponde à l'ossature bois traditionnelle, on pourrait les faire plus large, le carton est résistant et pourrait nécessiter moins de montants, mais les gens n'y croiraient pas et notre but est de développer notre produit tranquillement, pas de provoquer une révolution. » Alain Marboeuf confie que sa société pense pouvoir faire un mur porteur tout en carton mais qu'ils développent leur produit peu à peu. La dernière maison construite a des modules IPAC en murs, toiture, plancher et isolation de dalle.

La société contrôle de très près l'utilisation de son produit et sa médiatisation. Le produit n'est pas vendu aux particuliers et ne le sera pas avant au moins 10 ans. Il n'est pas question qu'une mauvaise réputation ne se développe dans le cas où un particulier aurait mal mis en place l'IPAC. La société va donc ouvrir des formations pour les architectes et les professionnels du bâtiment qui souhaiteraient utiliser le produit.

L'IPAC est un nouveau type d'isolant qui permet d'améliorer la résistance de la structure bois d'une maison, mais l'entreprise reste discrète sur son produit. Elle le met en œuvre et l'améliore progressivement sans se médiatiser à outrance. Le carton utilisé ici est du carton ondulé neuf, mais les inventeurs ne souhaitent pas le rendre visible comme dans les projets de Shigeru Ban. Ils préfèrent lancer leur produit sur le marché de manière discrète.

La membrane enveloppant le carton est blanche aujourd'hui et on ne perçoit pas la couleur marron habituelle de la fibre du carton. Ici on vante les propriétés du carton mais on ne le montre pas, il se fait discret, on l'oublie. Caché derrière sa membrane puis derrière les parements intérieurs et extérieurs il disparait. Rien ne permet de distinguer une maison isolée avec l'IPAC d'une autre, et c'est bien la volonté de l'entreprise. Comme chez Shigeru Ban le carton est neuf, mais d'autres ont essayé de valoriser les déchets de carton. Les exemples suivant montrent que le carton abandonné dans les rue peut lui aussi être valorisé.



Maison de Belle-Ile en Mer - Morbihan



Maison à Rivière - Indre et Loire

3-2-2- Comme élément constructif: Développement de briques

3-2-2-1- Briques de carton et ciment

À travers le monde les papiers et cartons sont jetés en masse. Plusieurs laboratoires ont entrepris des essais afin d'utiliser les déchets de papiers et cartons comme ressource. Ils ont développé et testé des briques composées de plus ou moins de papiers et cartons et mélangés à différents liants. Les principaux essais se tournent vers le mélange de papiers et cartons avec du ciment et du sable, et d'autres se dirigent vers un mélange avec de la terre.

Une start up américaine BetR-blok et la société anglaise Econovate développent tous deux des briques composées de déchets de papier et carton mélangées à du ciment. Leur objectif est de développer un produit simple de même dimension qu'un parpaing classique afin de concurrencer la brique d'argile ou le parpaing de béton sur le marché de la maison individuelle. Leurs tests en interne montrent des capacités isolantes et acoustiques intéressantes. Plusieurs vidéos de tests de résistance au feu ou à la compression sont en ligne et démontrent la solidité de leurs produits.

Aux Etats-Unis une majorité de maisons individuelles sont construites en bois. Les créateurs du BetR-block soutiennent que leur produit issu du recyclage permettrait d'éviter de couper des arbres pour construire. Il s'agit de leur principal argument de vente. En Angleterre, la société propose aux entreprises de collecter gratuitement leurs déchets de papiers et de cartons. D'habitude les entreprises doivent payer pour faire recycler leurs déchets. Mais le principal argument de vente d'Econovate est les caractéristiques physiques du produit. La solidité et la résistance au feu et aux rongeurs sans ajout de produits chimiques sont valorisées, ainsi que le faible poids du produit et sa simplicité de mise en œuvre. Leur brique, l'éconobloc, est constitué de 70% de matériaux recyclés, essentiellement du papier destiné à être enfouit et du ciment « durable » dont ils ne disent rien de plus. La brique serait entièrement recyclable

La différence principale entre les deux sociétés est leur portée. Aux Etats-Unis la start up est jeune et le développement des briques de carton semble encore relativement artisanal au vu des machines employées. Cependant, en Angleterre, la productivité est d'un million de briques par an, la société possède un site internet développé et une politique d'exportation de leur produit. Ils souhaitent d'ailleurs se développer en France et essayent d'obtenir un avis technique auprès du CSTB.

Les deux sociétés travaillent à un mélange entre papiers, cartons et ciment ce qui donne aux briques une couleur grise et une certaine granulosité. D'apparence ces nouveaux produits ne sont pas si différents des parpaings classiques. Ils ne devraient pas choquer visuellement les clients.

3-2-2-2- Briques de carton et argile

En Espagne, des scientifiques de l'Université de Jaen, développent une brique composée de papiers et cartons mélangés à de l'argile. Le mélange est extrudé sous pression. Les briques obtenues sont ensuite cuites dans un four, à la différence des briques composées en partie de ciment qui sont simplement séchées à l'air libre. Ces nouvelles briques nécessitent moins de temps de cuisson mais sont aussi plus fragiles que les briques conventionnelles. Les chercheurs continuent à chercher un équilibre entre solidité et considérations environnementales.

Toutes les entreprises ventent les qualités environnementales de leurs matériaux à base de papier et cartons. Si ces briques sont fabriquées à base de papier et de carton récupérés, les unes y incorporent du ciment et les autres utilisent de l'énergie afin de cuire les briques. Ces produits ont des qualités mais ne constituent pas des modèles de production environnementale.

3-2-2-3- Briques artisanales

Outre les productions industrielles de briques on peut trouver en vente sur internet une presse qui permet de fabriquer chez soi de petites briques à partir de ses déchets de papier et carton. Il est proposé sur le site de laisser tremper le papier 24h dans de l'eau, puis de disposer le mélange dans la presse. Manuellement, on obtient des briquettes qui peuvent servir à de petites constructions. Il y est déconseillé d'utiliser ce genre de briques pour faire brûler et se chauffer. En effet, les encres présentent dans le papier dégagent des gaz nocifs à la combustion.

La brique de papier ou de carton est un produit qui peut être très technologique ou bien très simple. Ce qui en fait un matériau intéressant est sans aucun doute sa facilité d'approvisionnement. L'omniprésence du papier et du carton dans le monde en fait un matériau utilisable et détournable par le plus grand nombre.



BetR-Blok



Briques de la société Econovate



Briques de l'université de Jaen

3-3- Utilisation de déchets de papiers et cartons: Projet PH-Z2

On trouve du papier et du carton partout dans le monde, dans toutes les classes de la société, ce déchet est universel. Il existe quelques exemples d'utilisation du carton en architecture où le caractère de déchet n'a pas été dissimulé.

A Essen, en Allemagne , lors d'un concours, des jeunes architectes ont réalisé un bâtiment nommé PH-Z2, de 185 m², en balles de papiers recyclés. Afin de recycler le papier, on réalise des balles de déchets de papiers qui sont acheminée en usine afin d'être triées. Ici, les architectes ont utilisé 50 de ces balles afin de construire les murs de 6m de haut du bâtiment.

Les balles sont clairement visibles de l'extérieur et de l'intérieur du bâtiment. Elles ne sont pas régulières, la couleur de certains papiers tranche par rapport aux autres. Elles ne sont pas lissées ou cachées, le papier déchet est clairement percevable. De plus, afin de résister à l'eau le papier est recouvert de silicone transparent. Habituellement la structure d'un bâtiment est recouverte d'un parement esthétique qui cache ce qui n'est pas « beau ».

Le parement protège des intempéries, ici le silicone étanchéifie les murs le temps du concours. En effet, le bâtiment est une construction éphémère construite dans le cadre du concours international «espaces de travail mobiles», créé par la Société de développement Zollverein mbH et Zollverein School of Management and Design. L'objectif de ce concours était de créer des espaces temporaires pour les start-up de l'industrie du design. Les architectes avaient la possibilité de travailler à partir de papier recyclé et souhaitaient provoquer afin de parler de l'architecture temporaire.

Cela a clairement fonctionné, certains articles français publiés sur internet décrient très fortement l'aspect de la construction. Car même si ce n'est pas la première fois, loin de là, que des architectes utilisent des matériaux issus des déchets afin de construire, c'est véritablement l'aspect des balles de papiers qui choque. On a souvent vu les architectes faire preuve d'une grande ingéniosité afin de récupérer des matériaux et de les transformer pour les rendre esthétiquement acceptables, « beaux », afin de les mettre en œuvre dans des constructions contemporaines. Ici rien n'a été transformé, les papiers sont visibles, froissés, déchirés et peu engageants, ce sont déchets.

Leur utilisation expose les architectes à des critiques. L'esthétique décriée en priorité laisse apparaître peu à peu des préjugés concernant les capacités physiques du matériau. En jugeant l'apparence du bâtiment, le critique juge en même temps l'innovation du système constructif jamais testé auparavant. Une structure bois complémentaire aide les murs à porter 40% de la charge de la toiture. Cette structure est vue comme la preuve que le système est défaillant. L'auteur anonyme de l'article « La maison en papier » sur www.autoconstruction.at préfèrerait que l'on propose «du rêve constructif réaliste », car le papier ça n'est pas réaliste.

Ce genre de concours et de projets éphémères permet au contraire de

faire des avancées et d'innover. D'établir un point de départ, un précédent dans la construction. Un premier pas est posé et permet aujourd'hui d'améliorer le système de balles de papier porteuses.







PH-Z2

3-4 Conclusion

Après analyse de ces trois situations différentes d'emploi du carton dans l'architecture, on peut conclure que le papier et le carton sont des matériaux variés qui prennent des formes diverses et sont utilisés de manières différentes d'un projet à l'autre. Dans tous les cas les capacités de résistance physique et thermique des matériaux sont mises en avant.

Dans ces exemples on remarque que l'apparence compte en architecture. L'utilisation du carton dans les projets de Shigeru Ban est acceptable car le carton est neuf. Il est propre et beau et l'architecture est presque minimaliste. Dans l'IPAC ou dans les briques, le carton est caché, lissé, son image est contrôlée, afin de ne pas choquer les clients, au contraire du dernier exemple, qui expose le papier brut comme il est et s'expose aux critiques les plus vives.

Références

3-1- Utilisation du carton neuf de manière innovante dans un circuit court: Les tubes de carton par Shigeru Ban

- Jodidio, P. (2010). Shigeru Ban : complete works 1985-2010. Cologne: Taschen.
- Luna, I., & Gould, L. A. (2009). Shigeru Ban paper in architecture. New York: Rizzoli.
- McQuaid, M., & Otto, F. (2007). Shigeru Ban (Réimpr). Paris: Phaidon.
- Shigeru Ban Humanitarian Architecture / Aspen art museum 2014 / 59€. (s. d.).
- Keio university SFC Ban laboratory. 2010. Voluntary architects' network : making architecture, nurturing people, from Rwanda to Haïti / Shigeru Ban. Tokyo: Inax

3-2- Utilisation du carton comme un matériau classique

- La société BAT'IPAC vous propose l'IPAC, le premier Isolant Porteur Alvéolaire Cellulosé. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.batipac.pro/Pages/default.aspx
- Montage de la Maison en Carton. (2011). Consulté à l'adresse http://www.youtube.com/watch?v=hO6AIlc7Rck&feature=youtube_gdata_player
- Du carton pour bâtir des maisons « Drôme Hebdo. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.drome-hebdo.fr/blog/2013/09/15/du-carton-pour-batir-des-maisons/
- Alsace20. (s. d.). Insolite : la maison en carton, une innovation alsacienne. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=2o-4gwbqIAjk&feature=youtube_gdata_player.%20-%20Kaysersberg%201.%202014.
- Alsace20. (s. d.). Insolite : la maison en carton, une innovation alsacienne. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=2o-4gwbqIAjk&feature=youtube_gdata_player.%20-%20Kaysersberg%201.%202014.
- Une maison isolée en carton, c'est possible !. Consulté à l'adresse http://france3-regions.francetvinfo.fr/alsace/2013/04/25/c-est-une-maison-en-bois-et-en-carton-240765.html
- Lentreprise Prix Inno 09 Machome - vidéo Dailymotion. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.dailymotion.com/video/x1xpcv1_lentreprise-prix-inno-09-machome_news
- Machome voit l'avenir de l'habitat en carton alvéolaire. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.latribune.fr/regions/ile-de-

france/20121207trib000735948/machome-voit-l-avenir-de-l-habitat-en-carton-alveolaire.html
- Matériaux : Mac Home s'organise pour faire un carton - Construction21. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.construction21.org/france/articles/fr/materiaux--mac-home-sorganise-pour-faire-un-carton.html

3-3- Utilisation de déchets de papiers et cartons: Exemple de la maison déchet.

- BetR-blok. (s. d.). Intro to BetR-blok. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=J4op56fcPRM
- HOME. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.econovate.com/home/
- Le parpaing autoporteur en carton qui veut cartonner - Performance énergétique. (2015, avril 3). Consulté à l'adresse http://www.lemoniteur.fr/article/le-parpaing-autoporteur-en-carton-qui-veut-cartonner-28230009
- Laboratory Equipment. (s. d.). Paper Waste Used to Make Bricks. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=VBUbBGs8oNM&feature=youtube_gdata_player
- Nova tecnologia sustentável: Tijolos com papel reciclado. (2013, février 6). Consulté à l'adresse http://www.archdaily.com.br/br/01-95461/nova-tecnologia-sustentavel-tijolos-com-papel-reciclado
- Professor da UnB cria tijolo feito com papel das embalagens de cimento | Portal EcoDebate. (s. d.). Consulté à l'adresse https://www.ecodebate.com.br/2010/04/14/professor-da-unb-cria-tijolo-feito-com-papel-das-embalagens-de-cimento/
- Richard Cannon. (s. d.-a). The Eco Paper Log Maker. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=PVGUui9XdgI
- futureLab. (2013, janvier 14). Cientistas criam tijolos ecológicos a partir de resíduos de papel. Consulté à l'adresse http://futurelab.com.br/site/futurelab_blog/cientistas-criam-tijolos-ecologicos-a-partir-de-residuos-de-papel/
- Nova tecnologia sustentável: Tijolos com papel reciclado. (2013, février 6). Consulté à l'adresse http://www.archdaily.com.br/br/01-95461/nova-tecnologia-sustentavel-tijolos-com-papel-reciclado
- w w w . a u t o c o n s t r u c t i o n . a t: LA MAISON EN PAPIER. (s. d.). Consulté à l'adresse http://autoconstruction-at.blogspot.com/2011/04/la-maison-en-papier.html
- DRATZ&DRATZ ARCHITEKTEN, Anja Bäcker · PHZ2. (s. d.). Consulté 5 juin 2016, à l'adresse http://divisare.com/projects/168264-dratz-dratz-architekten-anja-backer-phz2
- rachelvallance. (2015, février 4). Using recycled paper in design. Consulté à l'adresse https://rachelvallance.wordpress.com/2015/02/04/using-recycled-paper-in-design/

Conclusion de la première partie

Dans cette première partie nous avons répondu à différentes questions. Nous avons observé que les papiers et cartons sont de vrais matériaux d'architecture, que leur filière se structure et se développe afin de s'adapter aux modèles d'économie circulaire durable et locale. Nous avons découvert différentes utilisations de ces matériaux et compris que ce ne sont pas des matériaux neutres et qu'ils ont un impact architectural important.

Cependant, plusieurs de questionnements demeurent, essentiellement des questions pratiques : Est-ce vraiment un matériau isolant ? Comment fabriquer une brique à partir de carton ? Que doit-on y ajouter en plus du carton ou du papier ? Quelles sont ses propriétés thermiques ? Peut-on fabriquer ce matériau à la maison ? Quelles sont ses possibilités d'utilisations ? etc…

Dans cette deuxième partie nous allons essayer de répondre à ses interrogations par l'expérimentation et l'étude de tests sur des briques de carton.

Expérimentation

Le papercrete ou liant papier est un béton de papier inventé aux Etats Unis dans les années 50. Il est originalement composé de 60 % de papier humide (journaux, magazines, prospectus), 30 % de sable, 10 % de ciments. Les proportions peuvent varier jusqu'à utiliser 60 % de papier humide 20 % de sable et 20 % de ciment. Aujourd'hui certains liants papiers sont même fabriqués sans ciment. C'est après avoir lu plusieurs articles et observé les photos des constructions avec ce matériau que j'ai décidé de mener une expérimentation afin de répondre à cette question : Les papiers et cartons récupérés peuvent-ils être utilisés comme matériaux de construction durables et locaux ?

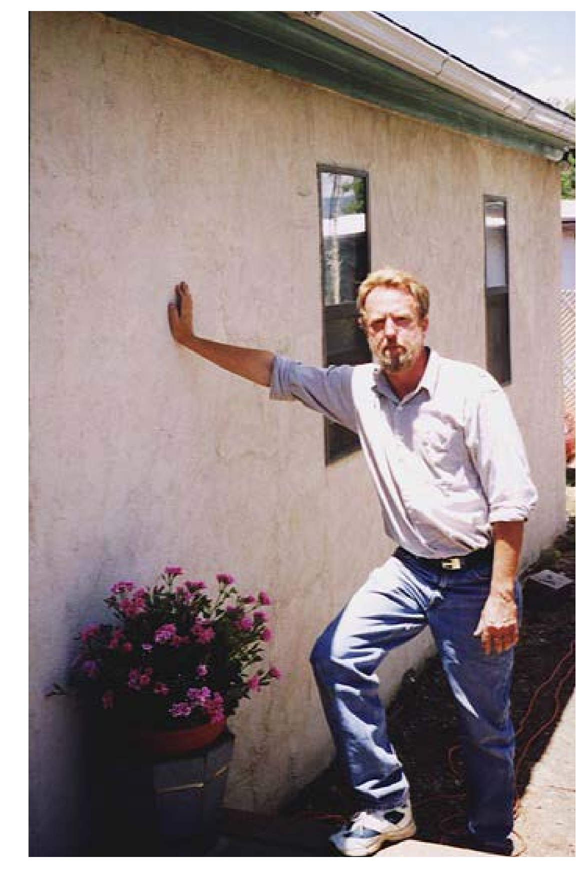


Maison de Rick Price





Maison de Tim Paye



Eric Patterson devant l'extension de sa maison

1- Cahier des charges

Objectif : L'expérimentation autour des papiers et cartons aura pour objectif la création de briques à base de papiers et cartons récupérés, peut-être la réalisation d'un mur.

Résultat : La réalisation d'un mur composé de ces briques était un de mes objectifs, cependant des contraintes non-anticipées notamment le temps nécessaire au séchage des briques de dimensions suffisantes pour la construction m'ont contraint à revoir mes ambitions.
Le papercrete peut se trouver sous forme de briques mais il peut aussi se couler dans des banches comme du béton afin de créer des murs d'un seul tenant. Plusieurs maisons ont ainsi été réalisées. Cependant il m'est plus facile de réaliser de petites quantités de mélange. En effet , l'école ne disposant pas de déchiqueteuse, j'ai dû déchirer le carton à la main. Je ne peux non plus utiliser un mélangeur car le carton, avant d'avoir été longtemps mis à trempé et broyé dans l'eau, en fait un mélange très dur à mettre en mouvement. Je dois donc exécuter ces taches à la main. Il serait trop long de faire suffisamment de mélange pour le couler dans des banches. J'ai donc choisi de ne fabriquer que des briques.

Objectif : Ces briques seront constituées de papiers et cartons récupérés localement. Le papier proviendra essentiellement des déchets de l'ENSA Nantes (service informatique, bureaux …) et le carton ondulé des déchets des commerces environnants. Différentes sortes de papiers et cartons pourront être utilisés, mais leur provenance ne dépassera pas le cadre de la métropole nantaise. Je souhaite tester la création d'un matériau à partir de déchets locaux.

Résultat : Je n'ai utilisé que des matériaux locaux. Lors des premiers essais en Bretagne j'ai utilisé les déchets en papier et carton de ma propre maison. Le sable et le ciment provenant d'un magasin de vente de matériaux situé à 700 m de chez moi. Lors des tests réalisés à L'ENSA Nantes j'ai utilisé du carton provenant de la benne de l'école dans la halle de fabrication. Le sable et le ciment proviennent de l'atelier de l'école. La terre provient des bords de Loire, devant l'école ou des sacs d'argile destinés à l'option « terre crue ».

Objectif : Les briques seront constituées de papiers et cartons agglomérés par un liant à déterminer

Résultat : J'ai testé trois sortes de pâtes. Les pâtes constituées de papiers et cartons à 100% Celles constituées d'un mélange de papiers, de cartons et de terre et celles constituées d'un mélange de papiers, de cartons, de sable et de ciment. J'ai souhaité tester l'utilisation de la sève d'arbre comme liant. Cependant je n'ai pas trouvé où en acheter et la récolter moi-même a un été un échec.

Objectif : Les briques doivent pouvoir être préfabriquées en atelier et acheminées par camion sur le site de construction. Les briques doivent pouvoir être manipulées facilement par un ouvrier. L'objectif est de créer une brique pesant moins de 10 kilos pour un minimum de 40 cm de long. Des briques plus petites pourront être crées mais elles devront être proportionnellement plus légères.

Résultat : Les briques sont toutes manipulables à la main.

Objectif : Des tests thermiques et mécaniques seront réalisés au laboratoire du département génie civil de l'IUT de Saint Nazaire.

Résultat : Les tests thermiques ont été effectués mais la presse étant cassé les tests mécaniques n'ont pas pu être réalisés.

Autre : L'étude de la résistance à l'eau, au feu ou aux nuisibles du mur n'est pas l'objet de cette expérimentation. Cependant de petits tests simples à réaliser et peu couteux en temps pourront être effectués.

2- Tests

2-1- Essais sans moules

01

<u>Composition:</u>
eau + carton craft déchiré en gros morceaux (5cm)

<u>Poids:</u> 65g

<u>Processus de fabrication:</u>
J'ai fait tremper le carton, coupé en morceaux d'environ 6 cm, dans l'eau pendant un quart d'heure. J'ai ensuite moulé un pavé avec le carton ramolli en le pressant à la main. Je l'ai laissé sécher à l'abris de la pluie, posé sur une bâche en plastique.

<u>Analyse:</u>
Le pavé encore mouillé ne semble pas solide. On sent que les morceaux de carton sans liants sont facilement désolidarisables les uns des autres. En séchant le pavé va se solidifier : S'il est bien résistant à la compression il se délite facilement à la main. On peut l'abimer en déchirant les morceaux de carton.


Brique sèche



Mélange


Brique humide



02

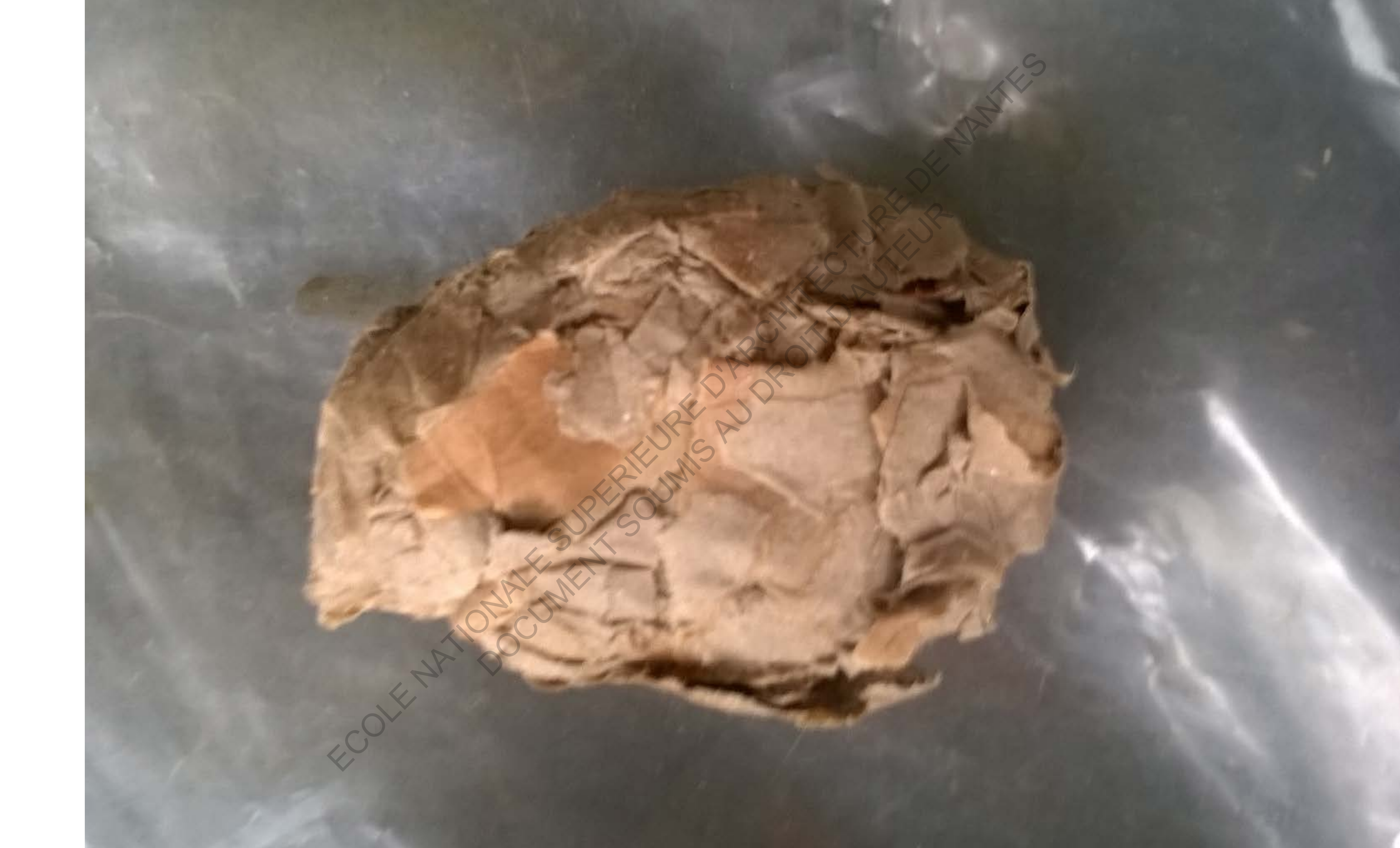
Composition:
eau+ carton kraft déchiré en petits morceaux (3cm).

Processus de fabrication:
J'ai fait tremper un quart d'heure dans l'eau des morceaux de carton d'environ 3cm de large. Le pavé est aussi formé et pressé à la main puis mis à sécher sur la bâche

Analyse:
Comme le pavé précédent il a tendance à perdre des bouts de cartons. Une fois sec il est plus résistant qu'humide mais il est facilement déchirable. Les morceaux de carton plus petits semblent s'agglutiner les uns aux autres plus aisément.


Brique humide


Brique en cours de séchage



03

Composition:
eau + carton kraft (1,5/2cm)

Poids: 111g

Processus de fabrication:
Le carton est trempé au préalable et ensuite déchiré et mixé à la main en une mixture grossière. La brique est ensuite pressée. La différence avec les tests précédents réside dans le temps de brassage du mélange et la taille des morceaux de carton. Ils font environ 1.5 cm /2 cm de large et je les brasse dans l'eau jusqu'à ce qu'ils se dissolvent un peu et paraissent un peu gluants.

Analyse:
La mixture est grossière, elle n'est pas lisse mais après pressage on constate que le pavé est plus homogène. Il ne perd pas de bout de carton et une fois sec il est plus solide que les deux autres. Il reste bien compact.



Brique sèche





Brique humide



Le carton sera détrempé au moins 24h si ce n'est plus dans tous les cas suivants. Cela permet de ramollir les fibres et de déchirer le carton sans fournir trop d'effort. Il est ensuite plus facile de l'incorporer à d'autres matières. Les photos présentent les briques coupées en deux.

04

<u>Composition:</u>
eau + papier journal et papier d'écriture

<u>Poids:</u> demi brique, 58g

<u>Processus de fabrication:</u>
J'ai mélangé des papiers courants et du papier journal dans de l'eau. Les fibres se déchirent facilement et forment une pâte plus homogène et plus lisse que toutes celles obtenues auparavant. Le mélange est facile à presser et à mouler.

<u>Analyse:</u>
Une fois sec on peut constater un pavé solide, plus dense par rapport aux trois précédents.



Brique sèche

mélange





Brique humide



05

<u>Composition:</u>
eau + papier journal

<u>Poids:</u> demi brique, 59g

<u>Processus de fabrication:</u>
Ce pavé est uniquement constitué de papier journal et d'eau. La mixture est moins fine que la précédente mais le pavé est aisé à former.

<u>Analyse:</u>
Une fois sec il est toujours plus grossier que le pavé en papier mixtes mais il semble tout aussi solide .

Ces deux pavés composés de 100% de papiers semblent assez résistants. Malgré le temps de séchage très long presque quatre semaines ils sont remarquablement solides et légers.



Brique sèche

Mélange





Brique humide



06

<u>Composition:</u>
eau + carton craft + terre végétale (du jardin)

<u>Poids:</u> demi brique, 121g

<u>Processus de fabrication:</u>
Une fois ramolli dans l'eau, le carton est transformé à la main en une mixture grossière. J'ai rajouté de la terre qui avait séché au soleil dans une brouette. La terre utilisée est une terre végétale non tamisée. De petits cailloux, brins d'arbre ou du sable peut être présent. Cette terre se mélange dans l'eau, cependant le liquide est présent en quantité trop importante dans le mélange et presser la brique tout en gardant la terre se révèle difficile.

<u>Analyse:</u>
Le pavé final est finalement assez ressemblant aux précédents en carton.


Brique sèche


Brique humide



07

Composition:
eau + carton craft + terre végétale (du jardin)

Poids: 501g

Processus de fabrication:
Je fais le choix d'une terre plus collante ainsi que d'utiliser moins d'eau. Pour ces pavés j'ai légèrement pressé le mélange carton eau afin d'évacuer un peu d'eau avant d'ajouter la terre. J'ai été creuser dans le sol afin d'extraire de la terre encore humide. Le mélange entre le carton et la terre se fait plus facilement. Il va mettre encore plus longtemps que les pavés 100% papiers ou carton à sécher, près de 5 semaines.

Analyse:
Une fois sec le pavé est solide et très léger. Les mélanges impliquant de la terre sont les plus légers à volume égal avec les autres pavés ou briques. La terre est un excellant liant pour le papier ou le carton, elle permet par ailleurs de lisser le pavé.



Brique sèche



Brique humide



Mélange



08

<u>Composition:</u>
eau + papier glacé /enveloppes + terre végétale (du jardin)

<u>Poids:</u> 405g

<u>Processus de fabrication:</u>
J'utilsie la même terre pour fabriquer cette brique. Cependant j'utilise des enveloppes et du papier glacé. La mixture est plus fine qu'en utilisant le carton et la terre se mélange très bien avec.

<u>Analyse:</u>
Mais une fois sec le pavé, hormis par sa taille, n'apparait pas très différent du précédent.


Brique sèche


Brique humide



2-1- Conclusion

Méthode de fabrication: Afin de ne perdre ni temps ni énergie à broyer le carton il faut laisser ce dernier ainsi que le papier tremper au moins 24 heures afin de laisser le temps aux fibres de ramollir. Cela facile le mélange entre eau et carton.

Séchage: Malgré le soleil les briques sont pleines d'eau jusqu'au cœur. Elles mettent donc beaucoup de temps à sécher, d'autant plus si on ajoute de la terre comme liant. Les plus longues ont mis cinq semaines à sécher.

Liant: Plus le mélange est mixé fin plus la brique est liée : Les éléments du mélange s'agglomèrent bien.

Poids: Sans calculer les masses volumiques, ce qui serait difficile au vu des formes non régulières des briques, on remarque que celles en carton seul sont plus légères que les briques de carton et terre.

La suite: Si l'on souhaite pouvoir empiler les briques afin de construire un mur il faut en fabriquer de plus régulières. C'est pourquoi toutes les autres seront désormais crées à l'aide d'un moule.

2-2- Essais avec un moule de petite dimension

A partir d'ici tous les tests sont réalisés avec du carton seulement. Il faut réunir beaucoup de papiers afin de réaliser une brique avec, or les ressources en carton sont abondantes dans les rues et beaucoup plus facilement accessibles.

01

<u>Composition:</u>
60% de carton 10% de sable et 30% de ciment (Pourcentage du volume de pâte). C'est le dosage du papercrete.

<u>Poids:</u> demi brique, 1944g

<u>Processus de fabrication:</u>
Les premiers pavés mettent beaucoup de temps à sécher par conséquent je décide d'ajouter du ciment dans le mélange.
Après avoir fait ramollir le carton j'incorpore d'abord le sable au mélange puis le ciment. Je mesure le volume du mélange d'eau et de carton et ensuite j'ajoute proportionnellement du sable et du ciment. Comme je n'ai pas préparé la même quantité de mélange à chaque fois (en fonction du temps que j'avais ou des quantités de carton à disposition) les briques n'ont pas la même hauteur (la largeur et longueur étant fixe grâce au moule).
Une fois le mélange homogène je le coule dans un moule et je presse la brique. Il faut monter debout dans le moule sur une plaque de bois afin de réussir à évacuer le plus d'eau possible du mélange. Une fois que l'eau s'arrête de couler je retourne le moule et démoule la brique. J'agirai de cette manière pour tous les essais suivants.

<u>Analyse:</u>
Une fois sec le pavé, hormis par sa taille, n'apparait pas très différent du précédent. La brique va mettre 24h à durcir afin d'être manipulable. Mais elle va continuer de sécher pendant l'été. De gris foncé elle va passer au gris clair. C'est le mélange contenant le plus de ciment parmi mes essais. Par la suite tous les essais tendront à réduire la dose de ciment et de sable afin d'augmenter la proportion de carton. Cette brique est aussi la plus lourde


Brique sèche


Brique un jour après séchage



02

Composition:
60% de carton 20% de sable et 20% de ciment

Processus de fabrication:
La dose de carton reste la même, c'est la proportion de sable et de ciment qui s'équilibre. Cette brique va mettre autant de temps à sécher que la première, elle sera toutefois plus foncée, même une fois sèche.

Analyse:
Elle pèse moins lourd que la précédente. Elle est plus granuleuse et résiste moins que la première lorsque, une fois sèche, je la casse en deux.



03

Composition:
60% de carton 30% de sable et 10% de ciment.

Poids: demi brique, 2378g

Processus de fabrication:
Pour ce dernier mélange à 60% de carton la proportion de ciment et de sable est inversée, il y a seulement 10% de ciment et 30% de sable.

Analyse:
La brique une fois sèche est plus claire que la précédente mais beaucoup plus granuleuse. Ses arrêtes et ses angles s'effritent : Elle est moins résistante que les deux précédentes. Contrairement aux deux autres la casser en deux provoque une perte de sable et de morceaux de carton. C'est la première brique qui laisse apparaitre des morceaux de carton en apparence. On les distingue sur les parois.



Brique sèche





04

Composition:
70% de carton 20% de sable et 10% de ciment.

Poids: demi brique, 1716g

Processus de fabrication:
La tendance des essais suivants sera de diminuer la quantité de sable et augmenter celle de carton.

Analyse:
Plus la proportion de mélange eau et carton augmente plus le temps de séchage est long. Cette brique va mettre 48h environ à sécher. La paroi est assez lisse et laisse apercevoir des morceaux de carton. On remarque que le carton est visible lorsque l'on casse la brique en deux. On perçoit moins de fibres dans le mélange précédent.



Brique sèche





05

<u>Composition:</u>
70% de carton 10% de sable et 20% de ciment.

<u>Poids:</u> demi brique, 1798g

<u>Processus de fabrication:</u>
Dans ce mélange toujours 70% de mélange eau et carton mais cette fois la proportion de sable et de ciment est inversée.

<u>Analyse:</u>
La brique est moins lisse que la précédente: Des irrégularités et des aspérités apparaissent sur la paroi. Celle-ci s'avère moins solide que la précédente.

<u>Photos:</u> Exepté la première, les photos ne présentent pas la brique telle qu'elle était après le séchage. C'est cette brique que j'ai utilisée lors d'un test dans l'eau. Sa couleur est plus grise qu'auparavant.
On remarque cependant la couleur des morceaux de carton qui contraste avec celle, grise, du ciment.


Brique juste après son séchage


Brique sèche après test à l'eau



06

<u>Composition:</u>
85% de carton 15% terre végétale (du jardin)

<u>Processus de fabrication:</u>
J'ai souhaité expérimenter une brique en carton et terre plus grosse que les pavés précédents.

<u>Analyse:</u>
Les morceaux de cartons sont assez grossiers et donc visibles en surface. Cependant cette brique en terre n'a pas eu le temps de sécher en deux mois avant le déménagement de mes parents et donc de mon lieu de fabrication de briques. J'ai l'ai facilement cassée en deux, elle était encore humide à l'intérieur, l'extérieur commençait juste à sécher.





Mélange

Brique humide



07

Composition:
80% de carton 20% de sable

Processus de fabrication:
A la fin de ces essais je ne disposais plus de ciment. J'ai fabriqué deux briques composées de 80 % du mélange eau et carton et de 20% de sable.
J'ai effectué un test afin de savoir si juste moulées et humides on pouvait superposer deux briques et espérer qu'elles se solidarisent.

Analyse:
Sans ciment, les briques sont très granuleuses et perdent des morceaux de carton. Leur surface n'est pas lisse et elles sont plus fragiles. Elles n'ont pas adhéré ensemble lorsqu'elles étaient humides ni après en séchant. Il est nécessaire d'appliquer un mortier pour solidariser ces deux briques entre elles.



Briques humides

2-2- Conclusion

Cette première série de briques m'a permis d'aborder les mélanges entre le carton, le ciment et le sable. Ajouter du ciment aide à sécher. Il faut environ une journée avant de pouvoir manipuler correctement une brique. Plus la proportion de mélange eau et carton augmente plus le temps de séchage est long et moins la brique est résistante mais elle est cependant plus légère.

Si la proportion de sable augmente l'aspect général de la brique est moins lisse, les arrêtes et les angles s'effritent. La casser en deux provoque la perte de sable et de morceaux de carton.

Augmenter la proportion de carton ne rend pas la brique plus granuleuse, si le mélange est assez fin l'aspect de la brique reste lisse. Par contre le mélange carton sable sans ciment est un échec. La brique obtenue est granuleuse et fragile, elle s'effrite au toucher.

2-3- Essais d'un moule de grande dimension :

Afin de pouvoir comparer les propriétés des briques issues des trois types de mélange : 100% carton, carton et terre ou carton sable et ciment, j'ai réalisé trois briques de mêmes dimensions avec ces trois mélanges. J'ai réalisé cette fois des briques trois fois plus grandes. Ces tests ont été réalisés à dans la halle de fabrication de l'ENSA Nantes.

01

<u>Composition:</u>
100% de carton

<u>Poids:</u> 1299g

<u>Analyse:</u>

Cette brique est la plus légère des trois. Elle présente une surface où le carton est visible. Elle n'est pas dure au toucher commes les briques composées de ciment, elle a une certaine souplesse. Cette brique, comme les deux autres de cette série, n'est pas régulière malgré le moule. Elle met très longtemps à sécher et change de forme avec le temps et les déplacements qui lui sont imposés.



Brique sèche



02

Composition:
80% de carton 20 terre argileuse (destinée à l'option terre crue)

Poids: 1878g

Analyse:
Cette brique est un peu plus lourde que la précédente. Elle ne ressemble pas complètement aux précédents essais de brique à partir de carton et de terre. Elle a la même couleur mais un aspect un peu moins lisse. On distingue des fissures dans la brique ce qui n'est pas le cas dans les tests précédents.



Brique sèche



03

<u>Composition:</u>
80% de carton 10% de sable 10% de ciment

<u>Poids:</u> La limite de poids de la balance est de 3000g, cette brique dépasse ce poids

<u>Analyse:</u>

Cette brique est la plus lourde des trois. On distingue la couleur du ciment et celle du carton.
La brique est granuleuse, elle s'effritte légèrement sur les bords, les angles ne sont pas réguliers. Porter la brique laisse du sable sur les doigts.



Brique sèche



2-3- Conclusion

Les trois briques vont mettre longtemps à sécher. Il pleut régulièrement dehors et l'humidité dans la halle est assez forte. La troisième brique prend plus rapidement grâce au ciment. Mais elle mettra tout de même 15 jours pour sécher. Les deux autres, du fait de leur grand volume et de l'humidité, ne sèchent pas vraiment et restent molles. La brique 03 avec du sable et du ciment développe des moisissures en séchant et développe une forte odeur. Les briques 01 et 02 sèchent très lentement. L'emploi de morceaux de cartons grossiers d'environ 5 cm ne permet pas en pressant le mélange d'évacuer l'eau. Les briques sont donc molles, spongieuses et n'acquièrent pas de solidité. De plus leur forme fait qu'elles sont assez fragiles, elles sont soumises au risque de casse.

Je pensais l'expérience ratée. J'en avais déduit qu'avec une hygrométrie élevée je ne pourrai pas faire sécher de briques d'une telle dimension. J'avais imaginé faire sécher la brique dans un four, mais me refusant à utiliser plus d'énergie pour faire les briques je les ai laissées dans la halle.

Toutefois, en revenant fin février, après plus de deux mois les briques avaient séché et durcit.

Elles ressemblent à des pavés aplatis à cause de la dimension du moule utilisé. Elles sont irrégulières, leurs bords ne sont pas nets, elles ne sont pas lisses comparés aux premières briques ou aux premiers petits pavés.

2-4- Réalisation d’une série de briques :

J’ai réalisé une série de 9 briques de mêmes dimensions. Elles sont fabriquées dans un moule plus petit et plus haut afin de réaliser des briques aux dimensions proportionnellement égales à celles d’un parpaing classique. Elles mesurent donc environ 10cm de large, 10 cm de haut et 25 cm de long. Elles sont toutes réalisées à partir du même mélange composé de 80% d’eau et de carton, de 10% de sable et de 10% de ciment.

Par rapport aux briques précédemment réalisées j’ai changé le type de carton. Afin de ne pas perdre de temps, en attendant que le carton ondulé se ramollisse dans l’eau, j’ai utilisé des boites d’œufs réalisées en carton moulé. Ce type de carton est beaucoup plus fragile et moins résistant. Il se dissout après un quart d’heure dans l’eau lors du brassage du mélange.

Le mélange est fin les morceaux de carton ne font que quelques millimètres, un centimètre tout au plus. Je sépare le mélange en trois sceaux afin de pouvoir brasser de plus petites quantités. Ainsi l’incorporation du sable est aisée et il ne tombe pas au fond du sceau.

Presser les briques prend du temps, séparer le mélange en trois sceaux me permet aussi d’incorporer le ciment dans le mélange juste avant de presser. Ainsi le mélange ne commence pas à durcir avant d’être mis dans le moule. Le mélange est fin et les briques réalisées sont les plus régulières que j’ai obtenu.

Le nouveau moule permet de ne pas abimer les parois, les arrêtes ou les angles. Les briques mettront environ trois jours à sécher. Le mélange étant plus fin , l’évacuation de l’eau des briques par pression est facilitée. Elles sont aussi plus petites et compactes. Leur séchage est homogène.

Briques en cours de séchage





Brique sèche



Carton moulé - boîtes d’oeufs





Je pèse les briques à l'aide d'une balance précise au gramme près. Les briques font de 1499g à 2069g. Le poids varie un peu car je n'ai pas pressé autant chaque brique, il y a donc une différence de densité et de matière.

Après séchage je réalise une série de mesures pour chaque brique. Deux mesures pour la hauteur, une au centre et une à l'extrémité. Trois mesures pour la largeur, aux deux extrémités et une au centre. Enfin une mesure pour la longueur. J'effectue plusieurs mesures pour la hauteur et la largeur car la forme des briques n'est pas parfaite et j'essaie de me rapprocher le plus possible des bonnes dimensions afin de calculer correctement leur volume et masse volumique.

La masse volumique est le rapport entre une masse et son volume. Elle est donnée pour des corps à la température de 20 °C, sous la pression atmosphérique normale (1 013 hPa). Elle permet de comparer la masse de différents matériaux.

Masse volumique en kg/m3 de matériaux de construction courants[1] :
Béton : 2 500
Blocs en béton de granulats courants (parpaing) : 1900 à 2150
Argile : 1 300 - 1 700
Bois de pin : 500
Contre-plaqué : 440 – 880

La masse volumique moyenne des briques est de 840, celles-ci vont de 661 à 1027. La moyenne des masses volumiques sans les deux valeurs extrêmes qui diffèrent de beaucoup des autres briques est de 839 : les deux valeurs extrêmes se compensent.

La masse volumique de la série de briques est en moyenne 3 fois moins élevée que celle du béton et 2,4 fois moins élevée que celle d'un parpaing courant. Cependant la masse volumique moyenne est plus élevée que celle du bois de pin.

La création de briques avec du carton permet bien de créer des briques plus légère que les produits en béton ou granulats sur le marché. Par contre la masse volumique d'une brique de carton reste tout de même plus élevé que celle du bois de pin, essence couramment utilisée dans la construction.

Cette série de brique ressemble en apparence aux briques fabriquées en Angleterre et aux Etats-Unis. Plusieurs bâtiments ont été construits avec ce genre de briques[2]. Elles peuvent être utilisées pour la construction de cloisons internes, comme mur mitoyen et comme mur porteur. Elles sont utilisées comme un parpaing classique avec du mortier courant.

Ce mélange m'a permis de créer une série de briques régulières et solides. L'équilibre entre le carton, le ciment et le sable est satisfaisant. La brique ne s'effrite pas, les morceaux de carton ne sont pas apparents en surface. La dose de ciment a été réduite au minimum : 10%. Au-delà la solidité de la brique est compromise. C'est donc ce dosage que je testerai dans le laboratoire de Saint Nazaire.

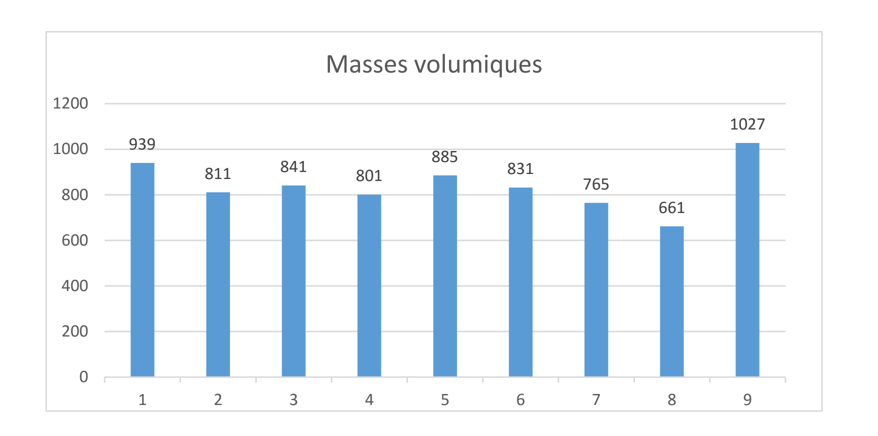
1 Grandeurs données par Philippe Poullain - Masse volumique. (2016, mai 27). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Masse_volumique&oldid=126547760

2 Econoblok+Brochure.pdf. (s. d.). page 10

Description		Dimensions en cm										masse	Calculs				
		Hauteur		hauteur moyenne	Largeur			largeur moyenne	Longueur	Longueur moyenne		masse	Volume	Volume moyen	Masse volumique		
		centre	extrémité	[cm]	a	b	c	[cm]	[cm]	[cm]		[g]	[cm³]	[cm³]	[kg/m³]	moyenne	moyenne sans extremum
carton ciment sable mélange fin	1	8,5	9,5	9,2	9,8	9,8	10	9,8	24,8	24,8		2069	2202	2240	939	840	839
	2	8,5	9,2		9,8	9,7	10		25			1764	2176		811		
	3	9,8	9,4		9,7	9,7	9,8		24,2			1902	2261		841		
	4	9,3	9,9		9,7	9,8	9,8		24,8			1862	2325		801		
	5	9,5	10,2		9,9	9,9	10		25			2166	2446		885		
	6	9,3	9,4		9,8	9,8	10,2		25			1930	2322		831		
	7	9,1	9		9,6	9,8	9,7		24,6			1651	2160		765		
	8	9,3	9,3		9,9	10	9,7		24,7			1499	2266		661		
	9	7,9	8,2		10,1	9,8	9,8		25,1			2055	2000		1027		

Mélange





2-5- Evolution des moules

01- Moules en plastique

Afin de fabriquer des briques il a fallu créer des moules. Tout d'abord j'ai utilisé une boite en plastique Mais le mélange était trop liquide. Le moule devait aussi permettre l'évacuation de l'eau présente dans le mélange. Il me fallait une boite percée. Je n'ai moulé aucune brique avec ce dispositif, il était impossible de presser le mélange.



Moules en plastique



01- Caisse de vin d’une bouteille

En premier lieu j’ai utilisé une caisse de vin d’une contenance d’une seule bouteille. Il était plus facile d’utiliser une boite déjà montée. J’ai percé une série de trous sur les parois latérales de la boite ainsi que dans le fond. Les trous de 2mm de diamètre étaient espacés de deux cm en moyenne. Le ciment présent dans la pâte ou les bouts de papier bouchent rapidement les trous.

De plus, en pressant le mélange afin d’en extraire l’eau, le moule a tendance à se déformer . Il a fallu utiliser un serre joint pour éviter au moule de rompre. Après plusieurs utilisations celui-ci est fragilisé. Du fait de la longueur du moule, les briques crées sont trop longues par rapport à leur largeur et épaisseur.



Moule



03- Caisse de vin pour six bouteilles

Le moule suivant est aussi une caisse de vin, mais d'une contenance de 6 bouteilles indiquer les dimensions. Les parois de 15mm sont un peu plus épaisses que celles du moule précédent.

Les trous percés afin d'évacuer l'eau sont de 3mm. On constate une amélioration de l'évacuation de l'eau mais ceux-ci finissent aussi par se boucher.

Les dimenssions de ce moule me permettent de créer des briques plus larges, moins à même de se casser. Cependant même en remplissant le moule du mélange liquide, la brique une fois pressée est assez fine. Afin d'obtenir une brique d'une dimension d'un parpaing il me faut un moule plus haut que large ou long.

De plus, démouler les briques s'avère plus difficile avec une caisse plus grande. Elles se cassent ou s'abiment. Le mélange est moins homogène, brasser à la main une plus grosse quantité de mélange est plus difficile. Le sable a tendance à retomber au fond. Les bords des briques ne sont pas nets et se brisent facilement, elles mettent aussi beaucoup de temps à sécher et développent des moisissures.



Caisse de vin pour six bouteilles



03- Moule en bois

J'envisage alors la construction d'un moule plus petit mais proportionel aux dimensions d'un parpaing. Le but est de créer des briques échelle ½.

J'ai fabriqué un moule avec des plaques de medium de 20mm d'épaisseur. Ainsi le moule ne risque pas de se déformer. J'augmente encore un peu le diamètre des trous percés afin d'évacuer l'eau. Ils font 4mm et s'ils laissent passer un peu de mélange dans les premières minutes, lorsque le ciment et le carton les bouchent un peu l'eau continue de s'évacuer.

La dimension du moule permet de fabriquer moins de mélange en même temps. Il est plus homogène et le sable ne tombe plus au fond du sceau.

Le médium utilisé est revêtu d'une surface lisse noire. Ce sont des plaques utilisées dans l'atelier de terre crue et qui servent aussi au moulage. L'utilisation de ces plaques de bois me permet de démouler aisément les briques. Elles glissent le long de la paroi et ne s'abiment pas. Pour faciliter le démoulage, ce moule ne comprend pas de fond. Il faut le poser sur une plaque au sol et appuyer dessus lors du pressage de la brique afin que le mélange ne se glisse pas entre la plaque et le moule. Mais une fois pressée la brique est facilement démoulable. Sans fond, on a juste à appuyer sur le dessus pour la faire sortir du moule. Les bords de la brique sont donc bien plus nets et les angles ne sont pas abimés.

Moule en bois



04- Moule en bois de très petite dimension

Afin de réaliser des tests mécaniques et thermiques des différents mélange, il a fallu créer des éprouvettes des briques. D'une dimension de 4cm de large et de haut et de 16 cm de long il a fallu créer un nouveau moule afin de réaliser ces éprouvettes.

J'ai utilisé une plaque de médium récupérée, le revêtement est un peu moins glissant que sur l'ancien moule mais comparé à la petite dimension des briques à réaliser cela suffit à les démouler. Ormis les dimensions il est en tout point identique au moule précédent. L'eau présente dans le mélange va cependant faire gonfler les plauques et rendre plus difficile le presage des briques. Cela n'était pas encore arrivé avec les moules précédents, malgré les nombreux trous permettant l'infiltration de l'eau dans le bois.



Fabrication d'une éprouvette

2-6- Résistance à l’eau et au feu :

2-6-1 Résistance à l’eau à l’eau

J’ai utilisé la brique 05 composée de 70% de carton 10% de sable et 20% de ciment dans un sceau contenant 2cm d’eau.

Aucun changement physique n’est à constater sur la brique au bout de trois heures. Pas de changement de couleur ou de résistance de la brique. J’ai ensuite oublié la brique pendant une ou deux semaines. Quand je suis revenue voir il n’y avait plus d’eau dans le sceau et la brique était sèche. En apparence aucun changement physique ou de couleur n’a eu lieu.

J’ai une deuxième fois positionné cette même brique dans un sceau avec deux cm d’eau. Je suis venue vérifier son état tous les deux ou trois jours. Celle-ci semblait absorber lentement l’eau et sécher. En la sortant de l’eau on pouvait constater que la moitié basse de la brique était de couleur plus foncée que le haut. Mais la partie humide de la brique n’avait en apparence pas subi de dommages physique quelconque. Sa résistance à la main semble la même.

J’ai de nouveau positionné la brique dans le sceau mais cette fois avec un niveau d’eau atteignant presque la hauteur de la brique. De cette manière un seul côté de la brique est émergé. Peu à peu la brique absorbe l’eau et sèche. En trois semaines le sceau d’eau est vide. En apparence la solidité de la brique en semble pas être affectée, cependant il faudrait effectuer de vrais tests en laboratoire pour pouvoir conclure sur la résistance à l’eau d’une telle brique.

Dans la brochure d’econoblok[1] par la société Econovate, ils précisent que leur brique de doit pas être laissée en extérieur non abritée. La base de la brique étant des fibres cellulosiques, les briques ne sont pas totalement résistantes à l’humidité. Ils conseillent un revêtement étanche à l’eau afin de protéger un mur en econoblok.

1 Econoblok+Brochure.pdf. (s. d.). page 10

2-6-2 Résistance au feu

Outre la résistance à l’eau, la résistance au feu est au cœur des interrogations concernant les structures en général et particulièrement celles en carton.

La société Econovate certifie ses produits en classe B,s1, do en Euroclass , équivalent M1 en réglementation française : La brique est classée comme matériau combustible mais ininflammable. S1 signifie qu’il y a peu de fumées et aucuns débris à la combustion.

L’argile est un matériau classé incombustible, est-ce que les briques de carton terre seraient incombustibles ? Je n’avais ni le temps ni les moyens pour effectuer ce genre de tests, mais ce sont des pistes de recherches intéressantes.

2-7- Conclusion

Lors de ces expérimentations, j'ai créé différentes briques en testant majoritairement trois types de mélanges, mais en variant les dosages. Des briques fabriquées seulement en carton, d'autres en y ajoutant de la terre et pour les dernières en ajoutant du ciment et du sable. Outre les premières observations et comparaisons avec des briques ou matériaux existants de nombreuses questions demeurent. J'ai choisi trois des dosages précédents afin de créer des éprouvettes, de petites briques destinées à être testées en laboratoire à St Nazaire.

3- Mesures à l’IUT

J’ai été accueillie à l’IUT de Saint Nazaire par Philippe Poulain, un enseignant chercheur et directeur de thèse au département Génie Civil. Il m’a accompagnée dans la confection des éprouvettes et a réalisé les mesures thermiques. Malheureusement la presse qui aurait pu servir à réaliser les tests de compressions et de flexion est cassée. Je n’ai donc pas encore pu effectuer ces tests.

3-1- Préparation des éprouvettes

Afin de réaliser des tests thermiques sur trois différents mélanges il faut réaliser des « éprouvettes », des échantillons de petites dimensions. Toutes de la même dimension 4 cm de haut par 4 cm de large et 16 cm de long pour tous les mélanges, afin de pouvoir comparer les résultats. Nous avons réalisé 9 éprouvettes, trois de chaque mélange, se destinant aux tests.

Chaque mélange se fait dans un sceau d'eau avec du carton passé à la déchiqueteuse donc réduits en bouts grossiers de 3 à 6 cm environ. Le carton, le sable, le ciment et la terre sont les même que lors de la création des 9 briques identiques. Le carton provient de boites d'œufs, c'est donc du carton moulé assez fragile. La terre utilisée est très argileuse et a déjà été tamisée. C'est la terre argileuse utilisée dans l'option « terre crue » à L'ENSA-Nantes. Une terre assez collante ici utilisée comme liant.

Le premier mélange comporte juste l'eau et le carton. On les mélange ensemble, jusqu'à ce que le carton ramollisse et se déchire facilement à la main.

On ajoute 10% de sable par rapport au volume eau et carton et 10% de ciment dans le deuxième mélange.

Le dernier mélange ajoute de la terre au duo eau/carton. En volume, la terre compose 20% du mélange, l'eau et le carton 80%

On presse manuellement dans un moule conçu aux dimensions souhaitées pour la fabrication des éprouvettes. Ce moule est fabriqué à l'aide de chutes de panneaux OSB au revêtement lisse qui permet un démoulage aisé des éprouvettes. Lors du pressage le moule va légèrement gonfler, c'est le premier moule à mal réagir à l'eau, toutefois le démoulage est encore possible et les dimensions des éprouvettes ne sont pas modifiées.

Moulage d'une éprouvette





Déchiqueteuse

Carton déchiqueté



3-2- Séchage et évolution des masses et des dimensions

Les éprouvettes issues des mélanges 1 et 2 (juste carton et carton/terre) sont pesées puis placées en étuve à 40 degrés Celsius. Les trois dernières issues du mélange carton/ciment/sable sont placées dans une salle à hygrométrie contrôlée de 20°C et de 90% d'humidité relative. Il faut attendre que les éprouvettes atteignent leur masse constante afin de réaliser les différentes mesures et tests. Une fois leur masse stabilisée on les pèse et on les mesure.

Les résultats obtenus (mesures physiques et thermiques) ne permettront aucunes généralités sur les propriétés de briques de carton. Tout d'abord car ils ont été obtenus à partir d'un faible échantillonnage, seulement trois éprouvettes par mélange, et ensuite parce que les briques de carton peuvent être fabriquées à partir de différents types de cartons, de différents dosages et de différents matériaux.

Les mesures moyennes obtenues à partir des résultats des briques à base de carton ciment et sable et des briques de carton et terre sont faussées car les résultats des six éprouvettes sont assez variés. L'écart type est souvent important quand on se rapporte à ces deux mélanges. En revanche les résultats des briques de carton seul sont plus homogène.

L'explication vient du fait que le carton utilisé pour fabriquer les briques a été déchiré en morceaux assez grossiers de 3 à 6 cm environ. Dans le cas du mélange 1 : eau et carton, le carton a bu l'eau et s'est déchiré lors du malaxage du mélange. Celui-ci était donc relativement homogène. En revanche lors des mélanges 2 et 3 avec la terre ou le ciment et le sable, le carton s'est moins déchiré et mélangé. Il restait des bouts assez importants dans le mélange.

Il aurait fallu laisser reposer le mélange et mieux dissoudre le carton afin que celui-ci soit plus homogène. La présence de plus gros bouts de carton dans les briques va faire varier certaines mesures comme celle de la masse volumique et de la conductivité thermique. Dans de plus grosses briques je pense que des morceaux de cartons un peu plus gros poseraient moins de problèmes, mais dans un échantillon aussi petit, cela engendre des résultats plus difficiles à interpréter.

Une barre d'erreur est présente sur les graphes, au-dessus des volumes indicateurs des résultats, c'est l'écart type entre les données.



Les neuf éprouvettes

3-2-1-Tableau des dimensions

	Description		***Dimensions en cm***												
		Hauteur				***hauteur moyenne***	***Largeur***						***largeur moyenne***	***Longueur***	***Longueur moyenne***
		a	***b***	***c***	***d***	***[cm]***	***a***	***b***	***c***	***d***	***e***	***f***	***[cm]***	***[cm]***	***[cm]***
Carton Seul	Carton 1	4,2	4,5	4,6	4,2	4,3	3,8	3,9	4,1	3,9	3,8	3,7	3,9	15,6	15,5
	Carton 2	4,1	4,3	4,3	4,0		4,1	4,2	4,2	3,9	3,8	3,7		15,3	
	Carton 3	4,0	4,4	4,5	4,2		4,0	4,0	4,0	3,8	3,8	3,7		15,5	
Carton+Ciment	Ciment 1	5,0	5,1	5,3	5,0	5,1	3,9	4,1	4,3	3,8	3,9	3,7	4,0	16,2	15,9
	Ciment 2	4,2	5,0	5,2	4,9		4,0	4,1	4,1	4,4	3,9	3,6		15,8	
	Ciment 3	5,3	5,4	5,5	4,8		3,8	4,3	4,1	4,0	3,9	3,8		15,8	
Carton+Terre	Terre 1	4,9	5,0	4,6	5,0	4,4	3,9	4,0	3,8	3,7	4,0	3,7	4,0	15,3	15,4
	Terre 2	4,2	4,0	4,0	4,0		4,0	4,4	4,3	4,0	4,1	3,8		15,6	
	Terre 3	4,5	4,4	4,3	4,2		3,9	4,0	4,2	4,2	4,0	3,5		15,4	

3-2-2- Tableau des mases et volumes

	Description	Masse		volume			Calculs			
		Humide	Sèche	Volume	Volume moyen	Teneur en eau initiale	Masse volumique			
		[g]	[g]	[cm³]	[cm³]	[%]	[kg/m³]	Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation
Carton Seul	Carton 1	267,0	72,4	264	259	269%	274	273	2	0,8%
	Carton 2	264,0	70,0	254		277%	275			
	Carton 3	266,0	69,7	257		282%	271			
Carton+Ciment	Ciment 1	385,0	259,7	326	321	48%	796	722	73	10,2%
	Ciment 2	412,0	198,7	306		107%	649			
	Ciment 3	453,0	237,9	330		90%	720			
Carton+Terre	Terre 1	501,0	280,7	287	271	78%	977	1069	91	8,5%
	Terre 2	473,0	277,2	259		71%	1070			
	Terre 3	501,0	308,0	266		63%	1159			

3-2-3- Dimensions

Les dimensions des éprouvettes étaient toutes les même au départ : 4cm de large et 16cm de long. La hauteur était variable, toujours au plus proche de 4cm. Cependant il était parfois difficile d'arriver à 4cm pile à cause de l'hétérogénéité du mélange. Les éprouvettes faisaient 4cm de haut au minimum environ 5.5cm au maximum.

Après séchage je réalise une série de mesures pour chaque éprouvette. 4 mesures pour la hauteur, 6 mesures pour la largeur et une pour la longueur. J'effectue plusieurs mesures pour la hauteur et la largeur car la forme des éprouvettes n'est pas très régulière et j'essaie de me rapprocher le plus possible des bonnes dimensions des éprouvettes afin de calculer correctement leur volume.

Après séchage on constate un léger retrait. Leur longueur varie de 15,3 à 16,2 cm de long. Elles ont perdu en moyenne 4 mm de long, ce qui correspond à 2,5% de la longueur de la brique.

La largeur moyenne après séchage est de 3.9cm pour le mélange 1 mais est toujours de 4cm pour les deux autres. Le retrait du au séchage est surtout visible dans la longueur de la brique.

3-2-4- Masses

3-2-4-1- Masse humide, masse sèche et teneur en eau

La masse humide est la masse de la brique à la fabrication, juste après le moulage. La masse sèche est sa masse stabilisée, lorsque la masse de la brique n'évolue plus. Elle ne perd plus d'eau. On peut calculer la teneur en eau des briques à partir des mesures des masses sèches et humides.

On constate de gros écarts dans les teneurs en eau des briques de carton ciment et sable : de 48 à 107% Cela montre bien que le mélange était hétérogène. Par ailleurs l'éprouvette qui possédait le moins d'eau à la base, et donc plus de carton, a la masse volumique la plus élevée. L'eau disparue, il y a plus de carton dans cette éprouvette que dans les deux autres.

Les éprouvettes fabriquées à partir du mélange carton et eau ont une teneur en eau de plus de 100% C'est qu'il y avait plus d'eau que de carton dans la brique au départ.

3-2-4-2- Masse volumique

La masse volumique est le rapport entre une masse et son volume. Elle est donnée pour des corps à la température de 20 °C, sous la pression atmosphérique normale (1 013 hPa). Elle permet de comparer la masse de différents matériaux.

Masse volumique en kg/m3 de matériaux de construction courants[1] :
Béton : 2 200
Blocs en béton de granulats courants (parpaing) : 1900 à 2150
Argile : 1 300 - 1 700
Bois de pin : 500
Contre-plaqué : 440 – 880

Masses volumiques en kg/m3 des éprouvettes par type de mélange :
Briques de carton : 273
Briques de carton et terre : 1069
Briques de carton ciment et sable : 722

1 Masse volumique. (2016, mai 27). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Masse_volumique&oldid=126547760

Les briques fabriquées avec seulement de l'eau et du carton sont très légères comparées aux autres briques ainsi qu'aux matériaux de constructions les plus courants : 8 fois moins lourdes que du béton et 1.8 fois moins lourde que du bois de pin.

Les briques de carton ciment et sable varient entre 646 et 796 kg/m3 ce qui les placent au même niveau que le contre-plaqué. Les briques les plus lourdes sont les briques de carton et terre, de 977 à 1159 kg/m3, un peu plus léger que l'argile mais plus lourd que le pin. Le carton présent dans la brique l'allège un peu par rapport à de l'argile pur.

L'entreprise anglaise Econovate, qui fabrique des briques à partir de carton ciment et sable, communique beaucoup sur son produit en mettant en avant son faible poids. D'après la brochure[2] de leur brique l'Econobloc la masse volumique de leur brique est 1100 Kg/m³. La brique est faite de papier et de ciment, mais sa masse volumique se rapproche de celles de mes briques en carton et terre. Cela peut s'expliquer par la finesse de la pâte d'Econovate. Leurs briques sont lisses, le papier et le ciment ont été broyés ensemble de manière très fine. Dans mes briques c'est du carton qui a été utilisé et il n'a pas été broyé aussi finement, il y a donc des morceaux de cartons dans la brique, ce qui diminue sa masse volumique.

On constate aussi que les échantillons produits à Saint Nazaire sont 2.5 fois plus légers que des parpaings courants. On peut envisager une production de briques à partir de carton, de ciment et de sable, plus légère que le béton ou les parpaings. Un produit donc plus aisé à transporter et à mettre en œuvre sur les chantiers. Le poids des parpaings a un impact important sur la maniabilité du bloc et sur la rapidité de mise en œuvre. C'est un critère de choix important pour ce genre de matériaux de construction, il est intéressant de chercher à le diminuer.

En parallèle on remarque le très faible poids des échantillons du mélange 1 (carton seul). Aujourd'hui je ne connais pas d'entreprise ou de personne ayant mené d'expérience afin de fabriquer des briques sans liant tel que la terre ou le ciment. En effet la brique est longue à sécher cependant sa masse volumique est intéressante : 8 fois plus légère que le béton ou le parpaing. Il faudrait bien sur comparer les deux matériaux sur d'autres critères tel que la résistance physique, ou l'effet de l'eau sur le matériau. Toutefois ce résultat est intéressant et c'est une piste de recherche intéressante.

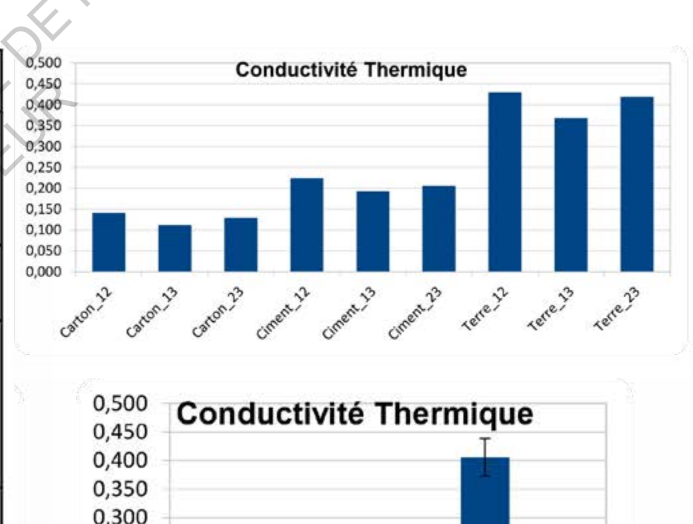
2 Econoblok+Brochure.pdf. (s. d.). page 5

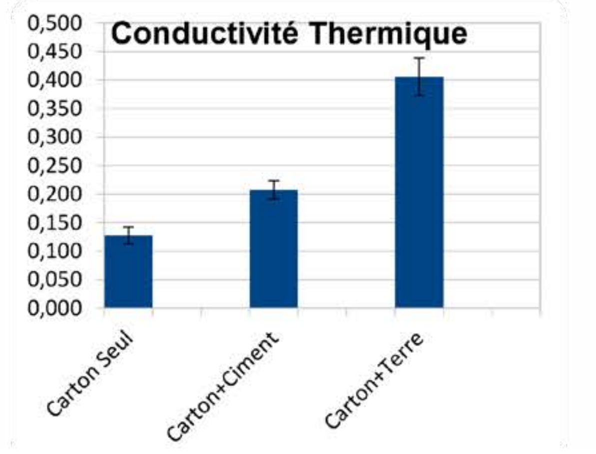
3-3- Mesures thermiques

3-3-1- Tableau des mesures thermiques

Description		Propriétés thermophysiques						
		Temperature	Conductivité thermique	Conductivité thermique [W/m.K]			chaleur volumique	chaleur volumique moyenne
		[°C]	[W/m.K]	Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation	[MJ/m³.K]	[MJ/m³.K]
Carton Seul	Carton_12	20	0,141	0,127	0,015	11,6%	0,643	0,704
	Carton_13	20	0,112				0,858	
	Carton_23	20	0,129				0,611	
Carton+Ciment	Ciment_12	20	0,224	0,208	0,016	7,7%	1,547	1,545
	Ciment_13	20	0,193				1,635	
	Ciment_23	20	0,206				1,454	
Carton+Terre	Terre_12	20	0,430	0,406	0,033	8,1%	1,151	0,946
	Terre_13	20	0,369				0,824	
	Terre_23	20	0,419				0,862	

Description		***Diffusivité thermique***	***Diffusivité thermique moyenne***	***Effusivité thermique***	***Effusivité thermique moyenne***
		[10^- 6 m²/s]	***[10^- 6 m²/s]***	***[J/m².s ^{0,5}.K]***	***[J/m².s ^{0,5}.K]***
Carton Seul	Carton_12	0,219	0,187	301	297
	Carton_13	0,130		310	
	Carton_23	0,212		281	
Carton+Ciment	Ciment_12	0,145	0,135	589	566
	Ciment_13	0,118		562	
	Ciment_23	0,141		547	
Carton+Terre	Terre_12	0,374	0,436	703	618
	Terre_13	0,447		551	
	Terre_23	0,486		601	





3-3-2- Méthode

Afin de réaliser les mesures thermiques sur les éprouvettes, nous utilisons la méthode du hot disk . Le principe de base du système est de fournir au matériau à caractériser une puissance constante pendant un temps défini via la sonde Hot Disk afin de générer une augmentation de température d'un à plusieurs degrés. C'est également la sonde qui est utilisée pour mesurer l'élévation de température, grâce à l'enregistrement de la variation de sa résistance électrique. La sonde Hot Disk est donc utilisée à la fois comme source de chaleur et comme capteur de température.

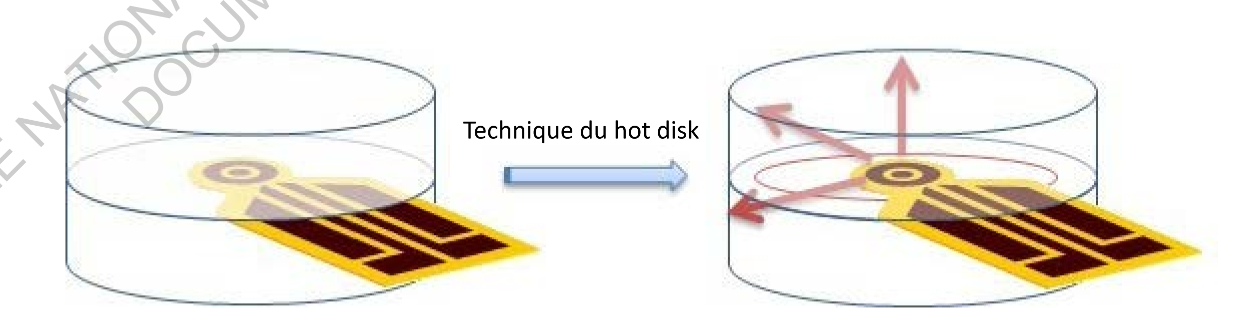
L'avantage de cette méthode est qu'elle constitue une méthode absolue. Cela veut dire qu'elle ne dépend pas d'un étalonnage par rapport à des matériaux ayant des propriétés de transfert de chaleur connus. On mesure en même temps la conductivité thermique et la diffusivité thermique. D'après le même enregistrement on obtient aussi la capacité en chaleur spécifique.

La sonde se compose d'une double spirale en Nickel sérigraphiée sur des feuilles minces d'un matériau isolant (Kapton ou Mica). Il faut la placer entre deux échantillons d'un même matériau. Afin que la sonde diffuse correctement la chaleur on utilise une pâte collante à base de silicone pour qu'elle adhère correctement aux deux échantillons. On teste les éprouvettes deux à deux, nous allons donc réaliser 9 mesures. Il faut que la sonde ait une profondeur sondable de 2cm au moins, il s'agit de l'espace nécessaire entre la sonde et le bord.

La sonde chauffe pendant 80 secondes. Ensuite les résultats sont transmis à l'ordinateur.


Technique du hot disk

Eprouvettes avec la marque du silicone



Technique du hot disk

3-3-3- Définitions

Afin de correctement interpréter les résultats obtenus, il faut comprendre les différentes grandeurs qui ont été mesurées, dont voici les définitions :

La conductivité thermique (λ= [W/m.K]) est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Elle représente l'énergie (quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 kelvin ou 1 degré Celsius par mètre.

La chaleur massique (J/kg.K) est déterminée par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse d'une substance.

La chaleur volumique d'un matériau (c=[J/m³.K]), est sa capacité à emmagasiner la chaleur par rapport à son volume. Elle est définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C, la température de un mètre cube de matériau. C'est le produit de la chaleur massique par la masse volumique.

La diffusivité thermique (D= [m²/s]) est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique).

L'effusivité thermique d'un matériau caractérise sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement.

3-3-4- Résultats

3-3-4-1- Conductivité thermique

Exemples de conductivités thermiques moyennes pour différents matériaux en W/m.K[3]:
Béton : 0,9 à 2
Terre compressée : 1,6 à 1,9
Bois : 0,2 à 0,4
Isolant : inférieur à 0,04

La conductivité moyenne mesurée sur les éprouvettes du mélange eau et carton est de 0,127 W/m.K La conductivité est légèrement moins importante que celle du bois mais quand même bien au-dessus des valeurs nécessaires pour considérer un matériau comme isolant. Les éprouvettes du mélange carton ciment sable ont une conductivité moyenne de 0,208 W/m.K et celles du mélange carton et terre de 0,406 W/m.K

En moyenne la conductivité thermique des éprouvettes se trouve proche de celle du bois. Les briques de carton sont de meilleurs isolants que le béton ou la terre compressée mais de moins bons isolants que l'IPAC de BAT'IPAC par exemple, qui a une conductivité thermique de 0.036 W/m.K[4].

Dans la brochure de l'entreprise d'Econovate[5], ils indiquent obtenir une conductivité thermique de 0.150 W/m.K pour leur brique de carton et ciment. Les éprouvettes en carton seul ou carton ciment et sable sont du même ordre de grandeur. Il est intéressant de constater que la brique réalisée en grosse proportion en Angleterre a sensiblement la même conductivité thermique que les briques réalisées ici à St Nazaire.

La résistance thermique d'un mur c'est son épaisseur divisée par la conductivité thermique du matériau. La réglementation thermique de 2012 impose aux bâtiments neufs des performances énergétiques minimales. Ainsi la résistance thermique d'un mur doit être de 4 au minimum. La RT2020 prévoit une résistance thermique minimale de 5.

Pour atteindre cette résistance thermique de 5 il faudrait 63.5 cm de mur en briques de carton du mélange eau, 1,04m de briques de carton ciment et sable et jusqu'à 2,3 m pour des briques en carton et terre. On peut exclure de construire avec des briques de carton et terre sans isolant, un mur de plus de 2m est une perte d'espace trop importante.

Un mur d'un mètre est une épaisseur très importante. Toutefois un mur de 63,5 cm semble réaliste, aujourd'hui certains isolants porteurs comme la paille nécessitent de fortes épaisseurs. Il faudrait cependant que ces briques de carton permettent de monter un mur structurellement capable de supporter une charpente et cela n'a encore jamais été testé.

Comme pour les résultats de masse volumique, le mélange d'eau et de carton ouvre des perspectives intéressantes de recherche.

3 valeurs données par Philippe Poullain

4 La société BAT'IPAC vous propose l'IPAC, le premier Isolant Porteur Alvéolaire Cellulosé. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.batipac.pro/Pages/default.aspx. Tests au CRITT d'Epinal.

5 Econoblok+Brochure.pdf. (s. d.). page 5

3-3-4-2- Chaleur massique et volumique

Exemples de chaleurs massiques moyennes pour différents matériaux en J/kg.K[6].
Béton : 880
Verre : 720
Bois : 1200 à 2700
Eau liquide : 4185
Or : 129

Plus la chaleur massique est faible moins il faudra d'énergie pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse de la substance. Par exemple il faut 32 fois plus d'énergie pour élever la température de l'eau d'un degré par rapport à l'énergie nécessaire pour augmenter la température de l'or d'un degré. Le métal chauffe plus vite que l'eau et c'est lié à la chaleur massique.

A l'inverse plus la chaleur volumique est faible plus il faut d'énergie afin d'élever la température d'un degré dans un mètre cube de matériau.

La chaleur massique du béton est de 880 J/kg.K pour une masse volumique d'environ 2500 kg/m3. On obtient donc pour le béton : 2,2 MJ/m3.K

D'autres chaleurs volumiques en MJ/m3.K
Fer : 3,496
Bois : 0.6336
Brique : 0.7308
Laine minérale : 0,0288

On remarque une grande différence entre les chaleurs volumiques des systèmes constructifs et celles des isolants qui sont beaucoup plus faibles. Plus le matériau est lourd, plus sa chaleur volumique est élevée.

La chaleur volumique moyenne la plus basse parmi les trois types de briques de carton est de 0,704 m3.K pour les briques de carton seul, ensuite vient les briques de carton et terre avec 0,946 m3.K puis les briques de carton ciment et sable avec une chaleur volumique de 1,545 m3.K. Ces chaleurs volumiques se situent donc entre les chaleurs volumiques de la brique (0,7308) et celle du béton (2,2). Contrairement à la conductivité thermique qui indiquait que le mélange carton terre était le moins isolant des trois mélanges, la température d'un mur en brique de carton seul sera beaucoup plus difficile à élever que celle d'un mur en carton ciment et sable. Cela nécessitera beaucoup plus d'énergie.

L'inertie thermique peut être définie comme la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit. Cette caractéristique est très importante pour garantir un bon confort notamment en été, c'est-à-dire pour éviter les surchauffes. L'inertie est une grandeur reliée à la chaleur volumique et à l'épaisseur du matériau. Inertie = chaleur volumique*epaisseur

Pour un mur de 35 cm en terre crue l'inertie est de 0,99 MJ/m²K
Pour un mur de 35 cm en brique de carton seul, l'inertie serait de 0,2464 MJ/m²K
Pour un mur de 35 cm en brique de carton terre, l'inertie serait de 0,3311 MJ/m²K
Pour un mur de 35 cm en brique de carton ciment et sable, l'inertie serait de 0,54075 MJ/m²K
C'est le mur de brique en carton ciment et sable qui possède la meilleure inertie grâce à une chaleur volumique élevée.

6 Capacité thermique volumique. (2015, novembre 16). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=-Capacit%C3%A9_thermique_volumique&oldid=12054598

3-3-4-3- Diffusivité thermique:

La diffusivité thermique (D= m²/s) est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique).

Physiquement, la diffusivité thermique exprime l'aptitude d'un corps à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber. Par conséquent, plus la diffusivité thermique d'un matériau est faible et plus la chaleur met de temps à le traverser. La diffusivité thermique exprime la faculté du matériau à transmettre la variation de température à travers la paroi. Elle nous permet de mesurer la durée que met la chaleur à traverser une paroi et donc de déterminer les capacités de déphasage d'un matériau.

Il sera difficile de faire des comparaisons entre les trois types de mélanges d'après les résultats obtenus car pour deux mélanges (carton seul et carton terre) une des trois valeurs mesurées est sensiblement différente des deux autres. Seuls les résultats du mélange carton ciment sable semblent plus homogènes avec des valeurs de 0,145, 0,118 et 0,141 en 10-6m²/s

Diffusivités thermiques de quelques matériaux courants en 10-6m²/s [7]
Liège : 0,115
Béton : 0,54
Air : 19,4
Cuivre : 116

Malgré l'imprécision des résultats moyens, on constate que toutes les mesures sont situées dans un intervalle entre 0,118 et 0,486. On remarque que ces diffusivités thermiques se rapprochent de celles du liège et du béton.

7 - Diffusivité thermique. (2016, février 16). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diffusivit%C3%A9_thermique&oldid=123423559
- Valeurs données par Bettina Horsch
- Diffusivité thermique. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.diffusivitethermique.fr/

3-3-4-4- Effusivité thermique:

L'effusivité thermique participe elle aussi à déterminer l'inertie thermique. Mais à la différence de la diffusivité thermique qui décrit la rapidité d'un déplacement des calories à travers la masse d'un matériau, l'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe les calories. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement. Au contraire, plus elle est faible, plus vite le matériau se réchauffe.

Le béton a une effusivité de 14 000 J/m².s0,5.K et le bois 400[8]. A température égale si l'on pose la main sur du bois il nous paraitra plus chaud que du métal.
Les briques de carton seul ont l'effusivité la plus faible de 297, ensuite viennent les briques de carton ciment sable avec 566 et très proche le mélange carton terre avec 618 J/m².s0,5.K.

Les briques en carton seul pourraient donc paraitre plus chaude au toucher que les deux autres mélanges, si toutefois leurs niveaux d'effusivité ne sont pas trop proches. On entend souvent que le carton est un matériau chaleureux et qu'au toucher il parait plus chaud que d'autres. Ici les briques faites sans liant ont une effusivité plus faible que les deux autres.

---

8 Effusivité thermique. (2015, février 18). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Effusivit%C3%A9_thermique&oldid=111963799

3-5- Conclusion des essais en laboratoire

De nombreux articles et ouvrages évoquent les qualités thermiques du papier et du carton. Toutefois il existe de nombreux papiers et cartons et ses capacités thermiques dépendent de la manière dont il est mis en œuvre. Un mur en papercrete n'a pas les mêmes caractéristiques thermiques qu'un mur en ossature bois isolé avec du carton ou une paroi de tubes de cartons remplis de papiers.

Dans le laboratoire j'ai pu mesurer certaines grandeurs caractéristiques du comportement thermique de trois briques de carton différentes. Ces résultats ne permettent en aucun de faire une conclusion générale, ni sur les briques de carton, ni sur l'utilisation du carton de manière plus générale. Ces tests n'ont pas visée à déterminer le potentiel isolant du carton.

Toute fois ces résultats sont intéressants et suggèrent la possibilité de lancer de nouvelles recherches au sujet des briques à base de carton.

Sur les trois mélanges, les briques à base de carton seul ont la meilleure conductivité thermique, nous avons vu qu'un mur de plus de 60cm serait suffisamment isolant pour correspondre aux normes thermiques de 2020. En revanche ce sont les briques du mélange carton ciment et sable dont la température s'élève le plus difficilement. On remarque aussi que les briques de carton pourraient constituer un mur de forte inertie. De plus les mesures d'effusivité thermiques semblent corroborer l'idée que le carton est un matériau chaleureux au toucher.

Les résultats ne sont pas aberrants et suggèrent un potentiel très intéressant. D'autres tests de résistance physique pourraient nous en dire plus sur ces briques. Un travail de recherche prolongé sur le dosage des différents mélanges, sur la forme des briques et sur leur application pourrait permettre de développer l'utilisation du carton dans l'architecture

Références

- Liant papier. (2016, février 21). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Liant_papier&oldid=123574290
- papercrete. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.papercrete.com/papercrete.html
- papercrete, fibercrete, fibrous concrete - Living in Paper. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.livinginpaper.com/construction.htm
- Econoblok+Brochure.pdf. (s. d.).
- Comment utiliser les Euroclasses dans la réglementation française CSTB .pdf. (s. d.).
- Hot Disk : mesure de conductivité thermique et diffusivité thermique. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.thermoconcept-sarl.com/index.php/fr/produits-caracterisation-thermique-cnd/analyseur-conductivite-thermique-hot-disk/conductivite-thermique-hot-disk
- Hot Disk AB - Testing Thermal Conductivity | Solutions. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.hotdiskinstruments.com/technology/solutions.html
- Diffusivité thermique. (s. d.). Consulté à l'adresse http://www.diffusivitethermique.fr/
- Diffusivité thermique. (2016, février 16). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diffusivit%C3%A9_thermique&oldid=123423559
- Effusivité thermique. (2015, février 18). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Effusivit%C3%A9_thermique&oldid=111963799
- Conductivité thermique. (2016, juin 2). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Conductivit%C3%A9_thermique&oldid=126706390
- Capacité thermique volumique. (2015, novembre 16). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Capacit%C3%A9_thermique_volumique&oldid=120545983
- Masse volumique. (2016, mai 27). In Wikipédia. Consulté à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Masse_volumique&oldid=126547760

4- Conclusion de la partie expérimentation

L’expérimentation autour des briques de carton avait pour but de répondre à différentes questions telles que:

Comment fabriquer une brique de carton? Quel liant ajouter? Sont-elles isolantes? Peut-on les fabriquer artisanalement? Sont-elles solides? Comment les utiliser?

Ces tests nous permettent-ils d’apporter une réponse à la question: Les papier et carton sont-ils des matériaux de construction durables et locaux?

La fabrication de briques de plusieurs sortes ainsi que les tests thermiques effectués à Saint Nazaire on pu aporter des débuts de réponses.

Nous avons expérimenté la création de briques à partir de matériaux locaux, le papier, le carton, la terre, le sable et le ciment provenaient de lieux présents dans un rayon de moins d’un kilomètre autour de l’école. Le sable et le ciment ont été achetés, mais la terre, le papier et le carton sont issus de la récupération.

Les différents essais nous ont permis de tester plusieurs sortes de liants et même de créer des briques de carton sans aucun additifs. La résistance et le poids des briques sont dépendants des liants mais on constate une apparente solidité pour la majorité des briques crées. Ces résultats sont encourageants et pourraient mener à de plus amples recherches

Les briques crées sont toutes manipulables à la main et plus légères que des parpaings classiques, on peut envisager de produire ce genre de produits afin de faciliter le travail des ouvriers sur les chantiers.

Les résultats obtenus nous permettent de comparer les tests réalisés à l’école avec des briques issues d’autres entreprises. L’apparence de la dernière série de briques ainsi que les études de masses volumiques nous permettent de les rapprocher de briques produites de manière industrielles. A condition de tests plus approfondis on peut imaginer une utilisation en mur porteur des briques produites.

Les tests en laboratoire nous ont permis de mieux comprendre le comportement thermique des différentes briques. En le comparant à d’autres mesures sur d’autres matériaux nous avons été en mesure de déterminer qu’un mur porteur en brique de carton pouvait être isolant.

La création de briques de carton est réalisable localement. Par ailleurs, il est possible de ne créer une brique qu’avec du carton et de l’eau. Une démarche respectueuse de l’environnement peut être envisagée. Il faudrait cependant faire attention aux quantités d’eau utilisées et à leur traitement.

Ces essais menés à l’ENSANantes et les tests en laboratoire ont permis d’explorer quelques mélanges et d’obtenir des premiers tests et résultats. Si on ne peut faire de conclusions définitive à propos de l’emploidu carton pour créer des briques, ces résultats nous encouragent à poursuivre les essais.

Conclusion

Depuis quelques années la proportion de carton utilisée dans le milieu de l'architecture augmente. Employé sur les chantiers, comme isolant ou élément de structure, le papier et le carton semblent avoir pris un véritable essort. Toutefois, beaucoup de questions subsistent quand à ces matériaux:
Leur présence sur le territoire est abondante, sont-ils une ressource locale possible? La possibilité de recyclage de ce matériau est intéressante. Alors que nous atteignons les limites de notre système de consommation actuel le papier et le carton peuvent-ils être considérés comme les nouveaux matériaux «durables»?
Malgré l'utilisation de tubes de carton par Shigeru Ban ce matériau se fait plutôt rare en système porteur, est-ce réellement un matériau solide? Peut-on le considérer comme un matériau d'architecture commun?

Les papier et carton sont-ils des matériaux de construction durables et locaux?

Dans une première partie nous avons étudié l'utilisation de ces matériaux dans le monde de l'architecture et conclu que le papier et le carton sont des matériaux utilisables dans la construction, en isolant et en système porteur.

La présence de ces matériaux sur le territoire ainsi que la réorganisation et le développement de la filière papier et carton autour de l'économie circulaire en font une ressource locale très intéressante.

Les expérimentations de briques et les tests de laboratoires ont permis de répondre positivement à certaines questions (création locale, artisanale, sans liant, manipulable) et d'en ouvrir d'autres (Capactités thermiques, résistance à l'eau et au feu).

L'étude des conséquences environnementales de la création du papier nous met en garde. L'utilisation de ces matériaux peut être dangereuse pour l'environnement si l'on ne fait pas attention à la provenance du bois utilisé ou aux conditions de fabrication. Le recyclage des papier et carton semble cependant se développer avec l'appui de la filière.

L'architecte Buckminster Fuller prédisait au carton un bel avenir dans le monde de la construction, en tant que matériau de de design, d'installations éphémères mais aussi en tant que matériau d'architecture. Shigeru Ban continue de mettre en valeur le carton dans ses projets et de nouvelles initiatives d'utilisations locales naissent.

D'ailleurs, l'emploi de papier et de carton dans l'architecture font aujourd'hui l'objet d'expériences variées. Il y a quelques jour j'ai découvert un système permettant d'enrouler du carton ondulé autour d'un module neuf de maison afin de l'isoler sans aucun pont thermique.

Bibliographie

Livres

- Ban, S. (2010). Voluntary architects' network: making architecture, nurturing people, from Rwanda to Haïti. Tokyo: Inax.
- Emmerich, D. G. (1983). Maisons en carton. Paris: Plan Construction.
- Jodidio, P. (2010). Shigeru Ban : complete works 1985-2010. Cologne: Taschen.
- Leblois, O. (2008). Carton: mobilier, éco-design, architecture. Marseille: ed. Parenthèses.
- Luna, I., & Gould, L. A. (2009). Shigeru Ban paper in architecture. New York: Rizzoli.
- McQuaid, M., & Otto, F. (2007). Shigeru Ban (Réimpr). Paris: Phaidon.
- Meadows, F. (2010). Carton plein !: 13 architectes à l'exercice de la cabane exposition, Paris, Cité de l'architecture et du patrimoine. Paris: Ed. Alternatives.
- Reis, D., Vian, B., & Bajon, C. (2006). Le monde des fibres. Paris: Belin.
- Schmidt, P., & Stattmann, N. (2009). Unfolded: paper in design, art, architecture and industry (Birkhäuser). Bâle: Birkhaüser.
- Shigeru Ban Humanitarian Architecture / Aspen art museum 2014 / 59€. (s. d.).

Billets de blog

- Cartographie de l'Anthropocène - Globaïa. (s. d.). Consulté à l'adresse http://globaia.org/fr/portfolio/cartographie-de-lanthropocene/
- futureLab. (2013, janvier 14). Cientistas criam tijolos ecológicos a partir de resíduos de papel. Consulté à l'adresse http://futurelab.com.br/site/futurelab_blog/cientistas-criam-tijolos-ecologicos-a-partir-de-residuos-de-papel/
- rachelvallance. (2015, février 4). Using recycled paper in design. Consulté à l'adresse https://rachelvallance.wordpress.com/2015/02/04/using-recycled-paper-in-design/
- w w w . a u t o c o n s t r u c t i o n . a t: LA MAISON EN PAPIER. (s. d.). Consulté à l'adresse http://autoconstruction-at.blogspot.com/2011/04/la-maison-en-papier.html

Article d’encyclopédie

- Anthropocène. (2016, avril 23). In Wikipédia. Consulté à l’adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Anthropoc%C3%A8ne&oldid=125545726
- Capacité thermique volumique. (2015, novembre 16). In Wikipédia. Consulté à l’adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Capacit%C3%A9_thermique_volumique&oldid=120545983
- Conductivité thermique. (2016, juin 2). In Wikipédia. Consulté à l’adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Conductivit%C3%A9_thermique&oldid=126706390
- Diffusivité thermique. (2016, février 16). In Wikipédia. Consulté à l’adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diffusivit%C3%A9_thermique&oldid=123423559
- Économie circulaire. (2016, avril 27). In Wikipédia. Consulté à l’adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89conomie_circulaire&oldid=125653659

- Effusivité thermique. (2015, février 18). In Wikipédia. Consulté à l’adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Effusi-

Article de journal

- Foucart, S. (2016, janvier 2). Allons-nous entrer dans l’anthropocène en 2016 ? Le Monde.fr. Consulté à l’adresse http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/01/02/allons-nous-entrer-dans-l-anthropocene_4840896_3244.html

Enregistrement vidéo

- Alsace20. (s. d.). Insolite : la maison en carton, une innovation alsacienne. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=2o4gwbqIAjk&feature=youtube_gdata_player.%20-%20Kaysersberg%201.%202014.
- BetR-blok. (s. d.). Intro to BetR-blok. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=J4op56fcPRM
- Claudine8475. (s. d.). Montage de la Maison en Carton. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=hO6AIlc7Rck&feature=youtube_gdata_player.
- Insolite : la maison en carton, une innovation alsacienne. (2010). Consulté à l'adresse http://www.youtube.com/watch?v=2o-4gwbqIAjk&feature=youtube_gdata_player
- Laboratory Equipment. (s. d.). Paper Waste Used to Make Bricks. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=V-BUbBGs8oNM&feature=youtube_gdata_player
- lemainelibre. (s. d.). Gabrielle Grandière, l'auteur de Pirouette cacahuète. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=KKDqck9JOHY
Montage de la Maison en Carton. (2011). Consulté à l'adresse http://www.youtube.com/watch?v=hO6AIlc7Rck&feature=youtube_gdata_player
- Richard Cannon. (s. d.-a). The Eco Paper Log Maker. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=PVGUui9XdgI

Pages web

- arbres - recyclons solidaire. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.arbres44.org/
- Center for History and New Media. (s. d.). Guide rapide pour débuter. Consulté à l'adresse http://zotero.org/support/quick_start_guide
- Circuit Court. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.mcm-web.org/index.php?option=com_content&view=article&id=242&Itemid=294
- Contribution sur les papiers (ÉcoFolio) - professionnels | service-public.fr. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F23280
- Copacel | Copacel. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.copacel.fr/fr
- Créations Carton. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.creations-carton.com/

- Créer un réseau d'entreprises pour une économie locale et durable | Mouvement Colibris. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse https://www.colibris-lemouvement.org/agir/guide-tnt/creer-un-reseau-dentreprises-pour-une-economie-locale-et-durable

- Des commerçants n'en peuvent plus des déchets. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.ouest-france.fr/pays-de-la-loire/nantes-44000/des-commercants-nen-peuvent-plus-des-dechets-970080/

- Diffusivité thermique. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.diffusivitethermique.fr/

- DRATZ&DRATZ ARCHITEKTEN, Anja Bäcker · PHZ2. (s. d.). Consulté 5 juin 2016, à l'adresse http://divisare.com/projects/168264-dratz-dratz-architekten-anja-backer-phz2

- Du carton pour bâtir des maisons « Drôme Hebdo. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.drome-hebdo.fr/blog/2013/09/15/du-carton-pour-batir-des-maisons/

- Économie circulaire - Ellen Macarthur Foundation. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse https://www.ellenmacarthurfoundation.org/fr/economie-circulaire/concept

- Economie locale - Le Labo de l'économie sociale et solidaire. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.lelabo-ess.org/+-Economie-locale-+.html

- France, C. O. de. (s. d.). Carton Ondulé de France - Carton Ondulé de France. Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.cartonduledefrance.org/

- HOME. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.econovate.com/home/

- Hot Disk AB - Testing Thermal Conductivity | Solutions. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.hotdiskinstruments.com/technology/solutions.html

- Hot Disk : mesure de conductivité thermique et diffusivité thermique. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.thermoconcept-sarl.com/index.php/fr/produits-caracterisation-thermique-cnd/analyseur-conductivite-thermique-hot-disk/conductivite-thermique-hot-disk

- Jamesse, G. (s. d.). Nantes Métropole - Le recyclage du papier-carton. Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.nantesmetropole.fr/pratique/dechets/le-recyclage-du-papier-carton-28664.kjsp

- La société BAT'IPAC vous propose l'IPAC, le premier Isolant Porteur Alvéolaire Cellulosé. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.batipac.pro/Pages/default.aspx

- Le parpaing autoporteur en carton qui veut cartonner - Performance énergétique. (2015, avril 3). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.lemoniteur.fr/article/le-parpaing-autoporteur-en-carton-qui-veut-cartonner-28230009

- Lentreprise Prix Inno 09 Machome - vidéo Dailymotion. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.dailymotion.com/video/x1xpcv1_lentreprise-prix-inno-09-machome_news

- Les laboratoires et les centres de transferts enstib. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.enstib.univ-lorraine.fr/fr/recherche/les-laboratoires-et-les-centres-de-transferts/
- Machome voit l'avenir de l'habitat en carton alvéolaire. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.latribune.fr/regions/ile-de-france/20121207trib000735948/machome-voit-l-avenir-de-l-habitat-en-carton-alveolaire.html
- Matériaux : Mac Home s'organise pour faire un carton - Construction21. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.construction21.org/france/articles/fr/materiaux--mac-home-sorganise-pour-faire-un-carton.html
- Ministère de l'Ecologie, du D. et de l'Aménagement durables, Nord-Picardie, C. d'Etudes T. de l'Equipement, & documentaire, P. d'appui national. (2014, septembre 17). Archires. Consulté 17 septembre 2014, à l'adresse http://archires.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.xsp?id=Archires-0094132&n=4&q=%28%2B%28typedoc%3A%7CTPFE%7C+typedoc%3A%7CMES%7C+typedoc%3A%7CPFE%7C%29+%2B%28sujet_word%3Acarton+sujet%3A%7Ccarton%7C%29%29&
- Nova tecnologia sustentável: Tijolos com papel reciclado. (2013, février 6). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.archdaily.com.br/br/01-95461/nova-tecnologia-sustentavel-tijolos-com-papel-reciclado
- ONF - Office national des forêts - Accueil. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.onf.fr/
- papercrete. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.papercrete.com/papercrete.html
- papercrete, fibercrete, fibrous concrete - Living in Paper. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.livinginpaper.com/construction.htm
- Papier classique vs Papier recyclé. (2010, septembre 22). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.consoglobe.com/papier-classique-vs-papier-recycle-4438-cg
- Professor da UnB cria tijolo feito com papel das embalagens de cimento | Portal EcoDebate. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse https://www.ecodebate.com.br/2010/04/14/professor-da-unb-cria-tijolo-feito-com-papel-das-embalagens-de-cimento/
- Qu'est-ce que l'économie circulaire ? (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.institut-economie-circulaire.fr/Qu-est-ce-que-l-economie-circulaire_a361.html
- Une maison isolée en carton, c'est possible ! (2014, octobre 1). Consulté 1 octobre 2014, à l'adresse http://france3-regions.francetvinfo.fr/alsace/2013/04/25/c-est-une-maison-en-bois-et-en-carton-240765.html
- Shigeru Ban Architects. (s. d.). Consulté 4 juin 2016, à l'adresse http://www.shigerubanarchitects.com/

Documents PDF

- 5-mars-2015-mip-communique-presse.pdf. (s. d.).
- analyse des risques associés à l'industrie papetière.pdf. (s. d.).
- C01-Papier_et_carton.pdf. (s. d.).
- certificat kaysersberg fsc.pdf. (s. d.).
- Comment utiliser les Euroclasses dans la réglementation française CSTB.pdf. (s. d.).
- copacel-rapport-statistique-2013-vdec14.pdf. (s. d.).
- dossier-de-presse_1 conférence MIP.pdf. (s. d.).
- Du papier responsable pour être sur de protéger la forêt WWF.pdf. (s. d.).
- Econoblok+Brochure.pdf. (s. d.).
- France, terre d'avenir de l'industrie papetière Rapport de Serge Bardy .pdf. (s. d.).
- L'avenir de l'emballage ondulé de france.pdf. (s. d.).
- les principaux impacts environnementaux liés a la production utilisation et élimination du papier.pdf. (s. d.).
- L'industrie papetière en chiffre par le ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi 2008.pdf. (s. d.).
- L'industrie papetière et le marché des papiers.pdf. (s. d.).
- L'industrie papetière_Alpha.pdf. (s. d.).
- Pollution accidentelles des eaux surface continentales 2005.pdf. (s. d.).
- Rejet de substance dangereuses dans l'eau CTP 03 juin 2014 COPACEL.pdf. (s. d.).
- Sustainability Report 2013-14 DS Smith Packaging.pdf. (s. d.).

Annexes

Entretien avec Alain Marboeuf, président de BAT'IPAC au salon de l'habitât de Guérande

Caractéristiques techniques de l'IPAC :

• Connaissez-vous la colle utilisée à l'intérieur d'une plaque de carton?
La colle utilisée pour coller les différentes feuilles de papier qui constituent la plaque de carton est de la colle à base d'amidon de maïs. La colle utilisée pour coller les plaques de carton entre elles est une colle blanche. « 0 COV, de la cellulose » me dit AlainMarboeuf.

• Quel type de carton est utilisé pour l'IPAC ?
Il s'agit de carton ondulé à triple cannelure (13.6mm). Ils ont commencé avec de la double cannelure (7mm) mais cela fait moins de plaques à coller si elles sont plus épaisses. Ils ont étudié les types de cannelures et c'est un carton à triple cannelure symétriques qui a été choisi. Les trois cannelures sont toutes identiques, dans le carton double cannelures il y en a une qui est plus fine, mais cela fait que le carton se courbe. Là les plaques sont bien plates et plus faciles à encoller.

• Pare pluie, pare vapeur ?
L'IPAC est enveloppé dans une membrane issue du recyclage du PVC, la membrane peut être recyclée ensuite. Il n'a pas fait de différence entre la membrane intérieure et la membrane extérieure et n'a pu me répondre quand au SD de cette membrane. « Les fiches techniques sont en train d'être faites. Je ne sais pas ». Je lui redemanderai.
A Belle Ile, la maison de Mr et Mme Lenoble a un pare-pluie à la demande de Mr Lenoble qui était inquiet. Mais leurs dernières réalisations n'en ont pas. Que ce soit sur les murs ou en toiture.

• Avez-vous fait des tests d'étanchéité à l'air ?
En 2009, la maison de Rambouillet obtenait 0,73 m³/h/m2. Ils ont testé le gymnase de Kaysesberg cette année et ont obtenu 0.57. « Le gars a fait le test trois fois car il n'y croyait pas. On avait le droit à 1,7 car le bâtiment fait 400 m². Tous nos détracteurs venus assister à notre chute sont repartis. Et encore, on n'avait pas étanché les trappes de désenfumage. On aurait pu faire mieux ! »

• La résistance thermique, lambda, déphasage ?
Le lambda de la cellulose est de 0.039. Ils ont fait un test au CRITT d'Epinal, pour un mur en ossature bois isolé avec 290 mm d'IPAC, la résistance thermique était de 7.88 m².K/W. Et le déphasage était de 15h.
« Plus que le lambda ce qui est important c'est le déphasage. En aout par 35 degrés à Kaysersberg, sans climatisation, il faisait 20 degrés dans le gymanase. »
Cela me semble très intéressant car un mur d'ossature bois classique isolé avec de la laine de verre a un très faible temps de déphasage.

• Avez-vous fait des études sur le cycle de vie du carton ?
Ils n'en ont pas fait mais s'appuient sur les

dire de Ds Smith packaging. Il semble assez peu sur de lui sur ce terrain là. Je lui ai parlé de consommation d'eau, de pollution de l'eau et de l'énergie consommée pour la production ou le recyclage et il semblait un peu gêné. Il m'a dit qu'il allait demander à un rapport à Ds Smith packaging.
Il me dit que le carton ne consomme pas d'eau car l'eau est en circuit fermé dans les machines de production.

• Qu'elle est la différence avec un mur d'ossature bois traditionnelle ?
La différence est qu'il n'y a pas besoin de panneau de contreventement. Le carton a une certaine souplesse et est très solide. Il renforce l'ossature bois, rendant inutile l'utilisation de panneaux de contreventement et permet une certaine résistance sismique (Je n'ai pas encore de preuve, ou de papier le prouvant). Lors des tests à Epinal ils ont fait un test d'arrachement. L'effort de rupture est à 34200N. « Deux fois plus qu'un mur à ossature bois classique » me dit-il. (Je n'arrive pas à trouver confirmation de ces informations sur internet. Je vais demander à l'ESB s'ils ont des chiffres concernant le point de rupture d'une cloison à ossature bois classique.)

Les dimensions de l'IPAC sont de 550 mm de large pour 120 mm de haut. « Il faut que ça correspondre à l'ossature bois traditionnelle, on pourrait les faire plus large, le carton est résistant et pourrait nécessiter moins de montants, mais les gens n'y croiraient pas et notre but est de développer notre produit tranquillement, pas de provoquer une révolution. » Alain Marboeuf me confie qu'ils pensent pouvoir faire un mur porteur tout en carton mais qu'ils développent leur produit peu à peu. La maison dont le chantier a commencé aura des modules IPAC en murs, toiture, plancher et isolation de dalle. Il compte prouver les capacités de son matériau sur cette maison avant d'envisager de poursuivre d'autres recherches. Les gens ne sont pas prêt à son avis. Il veut s'installer durablement et avoir une bonne image, il veut que les gens aient confiance et ne doutent pas.
Les dimensions restent standard aussi pour que les entreprises n'aient pas à changer leurs machines pour travailler leur matériaux. Ils espèrent qu'elles pourront changer de machines plus tard pour se faciliter la tache. En attendant toute entreprise de charpente peut travailler le produit.

• Quelles sont les faiblesses de l'IPAC d'après vous ?
D'après DS Smith Packaging, les deux problèmes du carton sont l'eau et la lumière. La membrane qui enveloppe le carton , le protège des deux éléments. Il y a eu une infiltration d'eau dans la maison de Mr et Mme Lenoble. Ils ont réparé la fuite et laissé l'eau s'écouler. Une fois sec il n'y avait aucune différence entre le carton qui avait pris l'humidité et les autres.
Je suppose qu'il ne faut pas que le carton reste trop longtemps dans l'eau tout de même, cela finirait pas le désagréer.
« On travaille à fabriquer un bateau en carton pour une régate, avec des voiles en papier, on ne craint pas l'eau ».

Développement de l’entreprise :

• Quels sont vos liens avec Ds Smith Packging ? Fabriquent-ils seulement les caissons de carton pour les fournir aux entreprises de charpentes ?
DS Smith packaging fournit juste le carton à l’ESAT en Alsace. C’est dans cet ESAT où travaillent 80 personnes que les plaques de cartons sont collées, découpées … afin de créer les blocs d’IPAC terminés. DS Smith packaging, premier fournisseur de carton en France (ils assimilent beaucoup de petites entreprises de production et de recyclage, sont implantés en de nombreux lieux en France et à l’international. C’est avec leur appuis que BAT’IPAC compte se développer à l’internationale. Ils ont depuis 2009 un brevet en France pour leur produit, mais aujourd’hui ils ont obtenu le brevet du produit à l’internationale.

• Avez-vous d’autres projets que des maisons individuelles en cours, d’autres ERP ?
Ils reçoivent tous les jours des demandent pour des projets, 650 demandes à ce jour. De la maison individuelle au lotissement de 50 à 60 maisons. L’entreprise ne comptant que 5 salariés ils ne peuvent répondre à la demande. Malgré tout il y a un projet de maison neuve, un projet d’extension et de rénovation d’une maison en cours en Loire Atlantique. Il y a aussi un projet de salle de réception, ERP privé, en projet. Les maisons seront livrées courant 2015.

• Avez-vous un projet d’isolation par l’intérieur avec Paris Habitat ?
Oui effectivement, un test d’isolation par l’extérieur est en cours. Ils attendent les résultats pour peut être signer un contrat.
Politique, réglementation et médias:

• Saint Gobain vous a-t-il contacté ? Avez-vous signé un accord avec eux ?
Saint Gobain a essayé de les acheter, ils ont refusé et par la suite St Gobain les a menacé en leur disant « On va revenir et poser un chèque sur la table, vous ne pourrez pas refuser ». Alain Marboeuf s’oppose à toute collaboration avec St Gobain, il tient à rester maitre de son entreprise. Il estime qu’il n’y a pas de concurrence en France dans le milieu du bâtiment et que St Gobain possède tout le second œuvre. Il est persuadé que son entreprise va aller loin et qu’ils font peur à St Gobain. Ils ont rencontré la ministre du logement qui soutient l’entreprise. Ils ont obtenu que les personnes qui s’occupent de la certification de l’IPAC au CSTB n’aient aucun lien d’aucune sorte avec St Gobain. Alain Marboeuf dit : « La première fois le CSTB a perdu nos papiers … ». La ministre du logement les soutient, l’avis technique sera délivré en 9 mois et non 18 mois (je ne me souviens plus si c’est valable uniquement pour eux ou si c’est pour toutes les entreprises désormais) et il devient possible pour les start up d’obtenir un avis technique. Alain Marboeuf me dit que le gouvernement s’implique pour faciliter leur développement, il pense, non sans raison, que le gouvernement cherche à se faire bien voir en vue du sommet sur le climat en décembre 2015. Ds Smith Packaging a été approché par St Gobain mais ils ont refusé de s’associer avec St Gobain.

• Des certifications ?
Aujourd’hui ils ont un atex B, il pense pouvoir obtenir l’avis technique mais il ne l’a pas demandé : « Les gens ne vont pas y croire, je préfère qu’ils viennent voir les bâtiments qui sont la preuve de ce que l’on avance ». La certification par le CSTB est en cours, les résultats devraient arriver

dans les prochains mois. En attendant c'est la smabtp qui assure leurs réalisations.

• Vous avez bénéficié d'une bonne couverture des médias, savez pourquoi ils s'intéressent de près à « la maison en carton » ?Les médias se sont intéressés à la paille (pourquoi compare-t-on toujours la paille au carton ?) et à d'autres matériaux. D'après Alain Marboeuf la paille est un isolant local qui ne permet pas de lancer une production à plus grande échelle. C'est cette idée de production à grande échelle qui aurait séduit les médias. (J'ai réussi à me mettre en contact avec TF1, je devrais sous peu correspondre avec le journaliste de TF1 qui avait fait un reportage sur l'utilisation de l'IPAC). Alain Marboeuf pense que c'est aussi une question de culture, que les gens font confiance au papier et à une industrie qui a 150 ans.

Autres :

• Le prix de cette isolation ?
Il semblait assez mécontent de TF1 et M6 qui ont fortement exagéré le prix des maisons. Le prix d'une maison isolée avec l'IPAC est le même que celui d'une maison conforme à la RT 2012. Les chaines de télévision n'hésitaient pas à parler de maison deux fois moins chères. La partie structure isolation de la maison des Lenoble a couté 65 000 euros, sans les fenêtres, plomberie, électricité … 100 000 euros au final m'ont dit les Lenoble.

• J'ai vu sur votre site que vous formiez les architectes et les professionnels
Les formations n'ont pas encore commencé, ils sont en train d'organiser un centre de formation. Alain Marboeuf veut commencer par se faire une bonne réputation dans le milieu professionnel. C'est pour cela que l'IPAC ne sera pas disponible aux particuliers avant au moins 10ans me dit-il. Pour l'instant ils en vendront l'IPAC qu'aux professionnels qu'ils auront eus même formés. Ils tiennent absolument à contrôler la mise sur le marché de leur produit.

• Pourquoi impliquer un ESAT (Etablissement et Service d'Aide par le Travail) ?
Hubert Lê inventeur de l'IPAC dirige un ESAT. Ils ont travaillé l'IPAC pour qu'il soit le plus simple possible et que des ouvriers en situation de handicap puissent les fabriquer. Aujourd'hui seul un ESAT produit l'IPAC, mais ils ont espoir de pouvoir donner à terme un emploi à plusieurs milliers de personnes en situation de handicap. Ils ne souhaitent pas augmenter leurs productions à outrance et cela ne leur coute pas plus cher dit-il.

Table des matières



Mémoire 100% papier recylé et carton récupéré